

Univerzita Palackého v Olomouci
Přírodovědecká fakulta
Katedra geoinformatiky

**ANALÝZA GENEROVÁNÍ RASTROVÝCH
A VEKTOROVÝCH MAPOVÝCH DLAŽDIC**

Diplomová práce

Bc. František PAVLÍČEK

Vedoucí práce: Mgr. Rostislav NÉTEK, Ph.D.

Olomouc 2019
Geoinformatika

ANOTACE

Po roce 2005, kdy Google představil rastrové dlaždice, přejala tuto technologii postupně všechny webové stránky věnující se mapám, i mapové knihovny. V podstatě v nezměněné podobě jsou rastrové dlaždice používány dodnes. Uživatelé však v současnosti vyžadují rychlé, a hlavně interaktivní webové mapy. Proto vznikly vektorové dlaždice, které zachovaly dělení mapy do čtverců jako v případě rastrových dlaždic, místo obrázků však uživatel v prohlížeči zobrazuje vektorové objekty, se kterými může nadále manipulovat. Tato práce se zabývá srovnáním obou přístupů, definuje shodné a odlišné znaky a uvádí technickou specifikaci obou řešení. Za použití obou zkoumaných technologií jsou pak vytvořeny mapové aplikace, které využívají různé formáty, úložiště a servery pro zpřístupnění dat ve formě mapových dlaždic. Tyto aplikace jsou podrobeny výkonnostnímu testování, které bylo navrženo tak, aby simulovalo uživatelské zacházení s mapovou aplikací. Porovnání je provedeno pomocí vybraných metrik jako je rychlost načítání, velikost stažených dat, množství požadavků na server apod. Na základě výsledků testování jsou popsány hlavní rozdíly mezi rastrovými a vektorovými dlaždicemi a definovány výhody a nevýhody obou metod.

KLÍČOVÁ SLOVA

rastrové dlaždice; vektorové dlaždice; webové mapy

Počet stran práce: 77

Počet příloh: 5 (z toho 3 vázané a 2 volné)

ANOTATION

After 2005, when Google introduced the raster tiles, all websites with maps and mapping libraries have adopted this technology and up to this day it is being used in the same way. But the users nowadays demand a quick and most importantly interactive web maps. That is why vector tiles have been created. The new principle has preserved the tiling of web maps as in case of raster tiles, but vector objects are loaded in the browser instead of pictures. These objects can be further manipulated by the user. This thesis compares raster and vector tiles, defines technical specification of the technologies and the similarities and differences between them. Using both raster and vector tiles, sample web map applications are created which use different tile formats, tile servers and access the data in various locations. These applications are then subject to a performance testing which was designed to simulate the user's behaviour when using the map. The comparison is done based on metrics such as the loading speed, the size of downloaded data or the amount of server requests. The test results describe the main differences between the raster and vector tiles and also the advantages and disadvantages of the methods.

KEYWORDS

raster tiles; vector tiles; web maps

Number of pages: 77

Number of appendixes: 5

Prohlašuji, že

- bakalářskou/diplomovou práci včetně příloh, jsem vypracoval(a) samostatně a uvedl(a) jsem všechny použité podklady a literaturu. *(Např. Ve své programové aplikaci jsem použil modul pro transformaci vektorových dat mezi prostorovými referenčními systémy, vytvořený)*

- jsem si vědom(a), že na moji bakalářskou/diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – školní dílo,

- beru na vědomí, že Univerzita Palackého v Olomouci (dále UP Olomouc) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, bakalářskou/diplomovou práci užívat (§ 35 odst. 3),

- souhlasím, aby jeden výtisk bakalářské/diplomové práce byl uložen v Knihovně UP k prezenčnímu nahlédnutí,

- souhlasím, že údaje o mé bakalářské/diplomové práci budou zveřejněny ve Studijním informačním systému UP,

- v případě zájmu UP Olomouc uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít výsledky a výstupy mé bakalářské/diplomové práce v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona,

- použít výsledky a výstupy mé bakalářské/diplomové práce nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem UP Olomouc, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly UP Olomouc na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Olomouci dne

Bc. František PAVLÍČEK

Děkuji vedoucímu práce Mgr. Rostislavu Nétkovi, Ph.D. za rady, podněty, připomínky a velmi cennou zpětnou vazbu při vypracování práce. Děkuji také své přítelkyni za neutuchající podporu v průběhu zpracování práce a svým rodičům za možnost absolvovat vysokoškolské studium.

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. František PAVLÍČEK**
Osobní číslo: **R170459**
Studijní program: **N1301 Geografie**
Studijní obor: **Geoinformatika**
Název tématu: **Analýza generování rastrových a vektorových mapových
dlaždic**
Zadávající katedra: **Katedra geoinformatiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem práce je komplexní analýza generování mapových dlaždic, konkrétně porovnání rozdílů mezi rastrovými a vektorovými dlaždicemi. Student provede zhodnocení dostupných nástrojů i metod, v první fázi se zaměří na matematické základy a technickou specifikaci obou řešení (orientace os TMS/WMTS, schéma pojmenování souborů/dlaždic x/y/z dle OGC apod.). Hlavní částí práce bude definování shodných a naopak odlišných znaků, porovnání principů a přístupů jak u rastrových tak vektorových dlaždic ze tří pohledů: vstupních dat, vlastního procesu generování a uživatele. Na základě analýzy provede student případovou studii jejímž cílem bude (na základě totožných vstupních dat, ale odlišných vygenerovaných dlaždic) demonstrovat porovnání z hlediska technologického (potřebná infrastruktura, softwarové a hardwarové požadavky apod.), výpočtového (čas, výpočetní výkon apod.), geoinformatického (definování stylů a propojení stylů v datech) a kartografického (generalizace, vlastní symbologie apod.). Výstupem bude jednak jednotná mapová sada různé symbologie, jednak mapová aplikace umožňující volbu mapové symbologie dle kontextu a typu dlaždic.

Student vyplní údaje o všech datových sadách, které vytvořil nebo získal v rámci práce, do Metainformačního systému katedry geoinformatiky a současně vytvoří zálohu údajů ve formě validovaného XML souboru. Celá práce (text, přílohy, výstupy, zdrojová a vytvořená data, XML soubor) se odevzdá v digitální podobě na CD (DVD) a text práce s vybranými přílohami bude odevzdán ve dvou svázaných výtiscích na sekretariát katedry. O diplomové práci student vytvoří webovou stránku v souladu s pravidly dostupnými na stránkách katedry. Práce bude zpracována podle zásad dle Voženílek (2002) a závazné šablony pro diplomové práce na KGI. Povinnou přílohou práce bude poster formátu A2.

Rozsah grafických prací: dle potřeby
Rozsah pracovní zprávy: max. 50 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná
Seznam odborné literatury:

Adamec L (2016): Vektorové dlaždice ve webové kartografii. Masarykova Univerzita. Diplomová práce.
ANTONIOU, V.; Haklay. Tiled vectors: A method for vector transmission over the Web. Web and Wireless Geographical Information Systems - 9th International Symposium, W2GIS 2009, 5886 LNCS, 56 - 71.
CORCORAN, P, P MOONEY, M BERTOLOTTO a A WINSTANLEY. View-and scale-based progressive transmission of vector data. Computational Science and Its Applications- ICCSA 2011. Springer, 2011, 51-62.
GOODCHILD, Michael F. Tiling large geographical databases. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1990, s. 135-146. ISBN 9783540469247.
MapTiler. <http://www.maptiler.com/>
OpenMapTiles. <https://openmaptiles.org/>
OpenStreetMap. <http://openstreetmap.org>
Voženílek, Vít. Diplomové práce z geoinformatiky. Univerzita Palackého, 2002.

Vedoucí diplomové práce: Mgr. Rostislav Nétek, Ph.D.
Katedra geoinformatiky

Datum zadání diplomové práce: 16. června 2017
Termín odevzdání diplomové práce: 5. května 2019

doc. RNDr. Martin Kubala, Ph.D.
děkan

L.S.

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
KATEDRA GEOINFORMATIKY
17. listopadu 50, 771 46 Olomouc
-1-

prof. RNDr. Vít Voženílek, CSc.
vedoucí katedry

V Olomouci dne 2. února 2018

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	10
ÚVOD	11
1 CÍLE PRÁCE.....	12
2 METODY A POSTUPY ZPRACOVÁNÍ.....	13
3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	17
3.1 Vektorová a rastrová reprezentace dat	17
3.2 Přenos dat ve webové kartografii	18
3.2.1 Datové formáty.....	18
3.2.2 Webové služby	20
4 MAPOVÉ DLAŽDICE	23
4.1 Rastrové dlaždice	23
4.1.1 Schéma dlaždic	23
4.1.2 Velikost a počet dlaždic	25
4.1.3 Metoda cache	26
4.1.4 Symbologie	26
4.2 Vektorové dlaždice	27
4.2.1 Schéma dlaždic	27
4.2.2 Rekonstrukce geometrií.....	30
4.2.3 Generalizace	31
4.2.4 Formáty	32
4.2.5 Symbologie	33
4.3 Zpracování rastrových/vektorových dlaždic	34
4.3.1 Generátory dlaždic	34
4.3.2 Servery pro poskytování dlaždic.....	35
4.3.3 Klientské knihovny s podporou dlaždic	36
4.3.4 Software s podporou dlaždic	37
5 TVORBA APLIKACÍ.....	39
5.1 Případová studie 1: Mapbox Studio	39
5.2 Případová studie 2: TileServer PHP.....	41
5.3 Případová studie 3: TileServer GL.....	44
5.4 Případová studie 4: Soubory PBF	49
5.5 Případová studie 5: Soubory PNG/WebP.....	51
5.6 Přehled vytvořených aplikací	53
6 TESTOVÁNÍ NAHRÁVÁNÍ DAT NA ÚLOŽIŠTĚ	55
6.1 Příprava a průběh testování	55
6.2 Výsledky testování	56
7 TESTOVÁNÍ VÝKONU APLIKACÍ	58
7.1 Příprava a průběh testování	58
7.2 Srovnání měření ráno/večer.....	59
7.3 Výsledky testování	61
7.3.1 Srovnání času načtení mapy.....	61

7.3.2	Srovnání času stažení jedné dlaždice	63
7.3.3	Srovnání počtu požadavků na server	64
7.3.4	Srovnání velikosti stažených dat.....	66
7.3.5	Srovnání neměřených aspektů.....	68
8	VÝSLEDKY	70
9	DISKUZE	73
10	ZÁVĚR	76
	POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE	
	PŘÍLOHY	

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Význam
BMP	Windows Bitmap
BSD	Berkeley Software Distribution
CORS	Cross-origin resource sharing
CSV	Comma-separated values
ESRI	Environmental System Research Institute
GIS	geografický informační systém
GML	Geography Markup Language
HAR	HTTP Archive
HTML	Hypertext Markup Language
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
JPEG	Joint Picture Experts Group
JSON	JavaScript Object Notation
KML	Keyhole Markup Language
MVT	Mapbox Vector Tile
ORP	obec s rozšířenou působností
OSM	OpenStreetMap
PDF	Portable Document Format
PNG	Portable Network Graphics
SE	Symbology Encoding
SHP	Shapefile
SLD	Styled Layer Descriptor
SSH	Secure Shell
TIFF	Tag Image File Format
WCS	Web Coverage Service
WFS	Web Feature Service
WMS	Web Map Service
WMTS	Web Map Tile Service
WPS	Web Processing Service
WWW	World Wide Web

ÚVOD

Když v roce 1996 MapQuest prezentoval první webovou mapu, tvořil ji pouze jeden obrázek. Kdykoliv uživatel provedl interakci s mapou, byl načten další obrázek, odpovídající požadovanému rozsahu zobrazovaného území. Tento princip byl používán až do doby, než Google představil tzv. slippy maps, v té době revoluční technologii, která udělala mapy rychlejší a dostupnější. Principem bylo rozdělení mapy na malé čtverce, tzv. mapové dlaždice. Mapu při zobrazení netvořil pouze jeden obrázek, ale několik obrázků vedle sebe s neviditelnými hranami. Výhodou přístupu bylo, že při libovolné interakci s mapou se nemusela načíst celá mapa znovu, ale načteny byly pouze ty části mapy, které nebyly zobrazeny dříve. Obrázky byly nazvány rastrovými dlaždicemi a nápad společnosti Google postupně převzaly všechny významné mapové aplikace a knihovny.

Od té doby uběhlo již 14 let. Internet, potažmo webové aplikace za tuto dobu prošly velkou změnou, ale technologie mapových dlaždic se v téměř identické podobě užívá dodnes. Nelze říci, že se nezměnilo vůbec nic, experimentuje se s formáty dlaždic, dlaždice se generují na požadavek, nikoliv napřed, měnila se velikost i rozlišení dlaždic. Princip však od roku 2005 významnějšími změnami neprošel.

Uživatelé sítě World Wide Web však dnes mají zcela jiná očekávání než před čtrnácti lety. Tehdejší standardům mapa jako obrázek mohla vyhovovat, dnes však je požadována dynamika, plynulost, rychlost a možnost interakce s mapou. Řešením se ukázaly být vektorové dlaždice, které převzaly princip dělení mapy do čtverců, místo obrázku však načítají vektorové objekty. Celá mapa se tak dostala do rukou uživatele. Se všemi objekty na mapě může uživatel pomocí JavaScriptu a jiných jazyků libovolně manipulovat, dotazovat se na ně, měnit jejich symbolologii a mnoho dalšího.

Vektorové dlaždice jsou stále poměrně novou technologií a počet webových map, které je využívají, není tak vysoký jako u map s dlaždicemi rastrovými. K přechodu z rastrové na vektorovou technologii se ale postupně rozhodují významní činitelé v oboru webových map, jako například Google Maps či Mapbox. Nejvýznamnější český mapový poskytovatel, Mapy.cz, se v desktopové aplikaci stále spoléhá na rastrové dlaždice a mezi českými uživateli se těší velké popularitě. Dá se tak říci, že obě technologie mají v současnosti na trhu své místo.

Tato práce porovnává rastrové a vektorové dlaždice z několika různých pohledů. Zaměřuje se na technickou specifikaci obou řešení, definuje jejich shodné a odlišné znaky, a následně popisuje potřebnou infrastrukturu pro využití obou přístupů, způsob generování dlaždic a tvorbu mapové symbolologie. Za využití rastrových i vektorových dlaždic je zkonstruováno celkem osm mapových aplikací, popisujících uvedené teoretické poznatky v praktické rovině. Nad vytvořenými mapovými aplikacemi je provedeno testování, které měří výkon aplikací dle vybraných metrik. Výsledky poskytují komplexní srovnání obou metod z teoretického i praktického hlediska.

1 CÍLE PRÁCE

Ačkoliv technologie mapových dlaždic je používána již téměř 15 let, způsob jejího použití se mění. Tato práce si klade za cíl provést komplexní analýzu mapových dlaždic, a porovnat rozdíly mezi rastrovými a vektorovými dlaždicemi. Tohoto cíle je dosaženo pomocí dílčích cílů práce.

Prvním dílčím cílem je srovnání rastrového i vektorového způsobu reprezentace dat a současných možností jejich přenosu po síti World Wide Web. Text se bude věnovat dostupným formátům a standardům pro rastrová a vektorová data a uvede ucelený výčet možností, jak je možné data šířit. Na tento úvod do problematiky bude navazovat stěžejní kapitola teoretické části o rastrových a vektorových dlaždicích. Oba přístupy budou porovnány z několika hledisek, jako jsou používaná schémata pro označení a uspořádání dlaždic, formáty používané při publikování dlaždic, či rozdíly v použití symbologie. Text se zaměří především na definování shodných, resp. odlišných znaků mezi oběma přístupy. Součástí této kapitoly bude také výčet nástrojů, které lze použít pro vytvoření dlaždic z vlastních prostorových dat a jejich následné poskytování uživatelům, a to jak z pohledu serveru, tak z pohledu klienta.

Na základě východisek uvedených v teoretické části budou následně provedeny případové studie, jejichž cílem bude demonstrovat rozdíly mezi poskytováním podkladové mapy v podobě rastrových a vektorových dlaždic. Hlavním výstupem této části práce budou mapové aplikace, které klientovi umožní zobrazit podklad v obou formách mapových dlaždic. Dlaždice navíc budou načítány z různých umístění, jako např. běžný webhosting, cloudové úložiště, či komerční úložiště společnosti Mapbox. Uživatel tak bude mít přímo šanci vizuálně porovnat rychlost načítání mapy při použití dané technologie a načítání dlaždic z různých míst uložení. Pro srovnání výkonu aplikací pak bude navrženo testování, které bude simulovat uživatelské zacházení s mapou. Díky tomu bude zjištěno, jak velký je časový rozdíl mezi načtením dlaždic v rastrovém a vektorovém formátu a také jak moc ovlivňuje rychlost načítání dlaždic jejich umístění, formát a způsob uložení. Kromě doby načtení budou měřeny i další metriky, jako je počet požadavků na server, velikost stažených dat při každé z interakcí apod.

Tato práce bude jednou z prvních na katedře geoinformatiky, která si klade za cíl vytvořit jako jeden z výstupů webovou aplikaci s podkladem tvořeným vektorovými dlaždicemi. Kromě detailního postupu tvorby takové aplikace bude navíc práce obsahovat také přehled dalších technologií, které lze při vytváření aplikace použít. Z pohledu budoucího uživatele pak práce přinese také zajímavé údaje o tom, o kolik pomaleji či rychleji se mapové podklady načítají dle svého umístění a také dle použité technologie dlaždic. Její výsledky tedy mohou do budoucna posloužit jako výchozí bod všem, kteří budou chtít vytvořit moderní webovou mapovou aplikaci s rychlou odezvou užívající jako podkladovou mapu rastrové či vektorové dlaždice.

2 METODY A POSTUPY ZPRACOVÁNÍ

Tato kapitola popisuje postup zpracování práce včetně použitých softwarů, dat a metod. Popsány jsou zde zejména programy a technologie, které nejsou v geoinformatice často užívané. Detailně se použití uvedených prostředků věnují příslušné kapitoly praktické části.

Použité metody

V práci jsou použity standardní geoinformatické metody. Pro vytvoření mapových aplikací bylo využito programování pomocí jazyků HTML5, CSS3 a JavaScript, kde jazyk HTML5 slouží pro definování prvků na webové stránce, jazyk CSS3 pro nastavení vzhledu těchto prvků a JavaScript pro možnost interakce s prvky na straně klienta. Běžně je v tomto modelu programování užito některé z dostupných mapových knihoven v jazyce JavaScript. Důvody výběru knihovny pro aplikace vytvořené v rámci této práce jsou uvedeny v textu níže.

Pro některé z vytvořených aplikací byla využita kontejnerizace. Tato relativně nová metoda umožňuje spouštět aplikace odděleně (pomocí tzv. kontejnerů) v prostředí k tomu určeném, kterým je v této práci Docker. Díky této technologii mohou být aplikace spuštěny prakticky v libovolném prostředí. Při jejich přenosu například z jedné cloudové služby na druhou pak stačí pouze instalovat Docker v novém umístění a kontejner zde spustit. Odpadají tak starosti s nastavením serveru.

Vyhodnocení dat naměřených při testování výkonu aplikací proběhlo pomocí standardních statistických metod. Pro srovnání hodnot naměřených ve dvou odlišných časových horizontech byl použit F-test analýzy dvou rozptylů. Tento test se často používá v případě, kdy má být určeno, zda libovolný zásah způsobil statisticky významný rozdíl v naměřených datech. Pro vyhodnocení údajů získaných při měření jednotlivých interakcí byl jako střední hodnota použit medián. Důvod jeho výběru je popsán v kapitole o testování aplikací.

Použitá data

Pro vizualizaci ve formě rastrových či vektorových dlaždic byla opatřena podkladová data z projektu OpenMapTiles, který vytvořila společnost MapTiler (dříve Klokan Technologies). Tento projekt nabízí extrakty dat z OpenStreetMap (dále také OSM) ve formátu MBTiles, který je popsán v práci dále. Jelikož data z OSM jsou licencována pod licenci Open Database License, poskytuje také projekt OpenMapTiles data pro nekomerční a vzdělávací účely zdarma. Pro firmy či komerční projekty jsou data poskytována buď formou jednorázového poplatku a následného stažení, nebo formou pravidelné měsíční platby, která uživateli nabízí pravidelnou aktualizaci zakoupených dat. Výhodou tohoto projektu také je, že dovoluje stáhnout pouze data za vybranou oblast. Soubor obsahuje dlaždice ve vyšší úrovni přiblížení pouze v zájmové oblasti, v nižších úrovních jsou ale obsaženy také dlaždice pokrývající zbytek světa, aby uživatel po oddálení mapy neviděl pouze prázdnou mapu. Schéma dat z projektu OpenMapTiles je dostupné na webových stránkách projektu a je šířeno jako open source pod licenci BSD (OpenMapTiles, 2019). Pro potřeby této práce byl pořízen extrakt pro Českou republiku ve verzi 3.6.1 platný k 3. 7. 2017, který dosahoval velikosti 788 MB.

V průběhu práce bylo zjištěno, že oproti schématu na stránkách OpenMapTiles neobsahují stažená data pro Českou republiku vrstvu popisů letišť. Ta byla opatřena také z OpenStreetMap pomocí pluginu QuickOSM, fungujícího v open source GIS softwaru QGIS. Tento plugin umožňuje stáhnout libovolná data z OSM pomocí zadání hodnot key a value. Při stahování dat lze také upřesnit pro jaké území mají být data získána. Byla

pořízena data pod hodnotami key=aeroway a value=aerodrome v rozsahu České republiky. Plugin po zadání stáhne data v bodové, liniové i polygonové formě a umístí je jako vrstvy do QGIS. V práci byla použita pouze data geometrie typu Polygon, která byla po stažení uložena jako soubor ve formátu GeoJSON.

Poslední použitou datovou vrstvou byla vrstva hranic obcí s rozšířenou působností (ORP), která byla pořízena z volně dostupné databáze ArcČR® 500 ve verzi 3.3. Tato datová vrstva byla pořízena jako Shapefile a následně v softwaru QGIS konvertována do formátu GeoJSON.

Použité programy

V průběhu řešení práce bylo využito několika softwarů a pluginů pro generování a publikaci mapových dlaždic. Prostředím, které v práci sloužilo pro oba zmíněné účely, se stal Docker, což je relativně nový nástroj, umožňující spouštět aplikace odděleně uvnitř tzv. kontejnerů. Často bývá Docker popisován také jako virtualizace, která nemá žádný overhead. Na rozdíl od klasické virtualizace, která využívá model hardware – operační systém – hypervisor – klientský operační systém – aplikace, pracuje Docker s modelem hardware – operační systém – Docker engine – aplikace. Díky tomu nejsou kladeny takové nároky na hardware hostitelského stroje, což je jedna z největších nevýhod klasické virtualizace. Docker nabízí instalační soubory pro platformy Linux i Windows, které však nelze použít pro operační systém instalovaný na počítači, na kterém byla práce tvořena, Windows 10 Home. Instalovat Docker na tomto operačním systému lze pouze pomocí balíčku Docker Toolbox, který obsahuje tři softwary:

- Oracle VM VirtualBox (software pro spuštění virtuálního stroje s operačním systémem Linux),
- Docker (samotné prostředí),
- Kitematic (grafické rozhraní pro správu aplikací v prostředí Docker).

Zároveň je před instalací vyžadováno také povolení virtualizace na hostitelském stroji. Zkontrolovat, zda je virtualizace povolena, je možné po spuštění Správce úloh na záložce Výkon v menu Procesor. V případě, že virtualizace povolena není, je možné změnu učinit v nastavení počítače.

V prostředí Docker byla spuštěna aplikace tippecanoe ve verzi 4.3. Tuto aplikaci vytvořili tvůrci knihovny Mapbox a jejím hlavním účelem je generovat z prostorových dat soubor ve formě mapových dlaždic, který bude možno zobrazit na různých úrovních přiblížení. Pomocí nástroje lze ze vstupních dat ve formátu GeoJSON, CSV či Geobuf vytvořit jediný soubor ve formátu MBTiles. Aplikaci nelze použít na operačním systému Windows, proto byla spuštěna v prostředí Docker. Je napsaná v jazyce C++ a volně dostupná na platformě GitHub.

Druhou aplikací spuštěnou v prostředí Docker byl TileServer GL, který byl použit pro publikování rastrových i vektorových dlaždic. TileServer GL je open source mapový server, vytvořený společností Klokan Technologies (dnes MapTiler). Jeho hlavní předností je možnost generování rastrových dlaždic „on-the-fly“ a jejich stylování pomocí specifikace Mapbox GL Styles. Stejným způsobem zvládá server vykreslovat také vektorové dlaždice. Zdrojový kód aplikace je dostupný na platformě GitHub.

Podobná aplikace jako TileServer GL je TileServer PHP. Od výše zmíněného serveru se liší jazykem, ve kterém je napsán. Jazyk PHP je u něj použit nikoliv z důvodu rychlosti, ale proto, aby byl maximálně usnadněn proces hostování dlaždic na běžném webovém hostingu. Server je nutné instalovat na hosting, na kterém běží webový server Apache a jazyk PHP 5.2+ s modulem SQLite. Jsou-li tyto podmínky splněny, stačí pro následnou instalaci pouze stáhnout čtyři soubory z platformy GitHub a umístit je do stejné složky,

kde se nachází také data, která se mají zobrazit. Data mohou být ve formátu MBTiles, či ve složce jako jednotlivé mapové dlaždice. Po otevření webové stránky na adrese, kde se nachází soubory TileServer PHP, je uživateli zobrazena úvodní obrazovka s příklady aplikací postavených nad různými knihovnami, které zobrazují mapová data uživatele. Kromě toho nabízí TileServer PHP také odkaz na WMTS službu, která může být použita v desktopových GIS softwarech. Využita byla verze serveru 2, která zvládá zobrazit rastrová i vektorová data.

Pro přenos dat na webový hosting, resp. na užívané cloudové úložiště, byly v průběhu práce využity softwary FileZilla ve verzi 3.41.2 a Altap Salamander ve verzi 3.08. K připojení na server na cloudu byl použit nástroj PuTTY a jeho extenze PuTTYGen. Tento nástroj umožňuje konverzi klíče k počítači na cloudu do formátu PPK, který umí číst například zmíněný software FileZilla, a také je možno se s jeho pomocí připojit k zakoupené instanci přes protokol SSH.

Posledním ze softwarů užitých v práci byl Cygwin. Tento jednoduchý program instaluje kolekci open source nástrojů a umožní tím používat příkazy z prostředí Linux na operačním systému Windows. Při instalaci je nabídnuta možnost specifikovat nástroje, které se mají nainstalovat a ty lze po dokončení instalace přímo používat prostřednictvím příkazové řádky ve Windows. V práci byla užívána verze softwaru 3.0.1.

Všechny webové aplikace vytvořené v rámci případových studií využívají knihovnu Mapbox GL JS, která je vůbec první mapovou knihovnou vyvinutou primárně pro tvorbu map tvořených vektorovými dlaždicemi. Ostatní mapové knihovny stále pracují s modelem podkladových dat, většinou ve formě rastrových dlaždic, a tzv. overlay dat, což jsou uživatelská data umístěná na podkladová nejčastěji ve formátu GeoJSON. Mapbox GL JS nerozlišuje mezi podkladovými a overlay daty a bere všechna zobrazovaná data jako jedinou mapu. I přesto, že knihovna je orientována primárně na práci s vektorovými daty, podporuje také zobrazení dat ve formě rastrových dlaždic. Pro vykreslování map je používána technologie WebGL, kterou již dnes podporují všechny nejčastěji využívané prohlížeče. V práci byla použita verze knihovny 0.52. Mapbox GL JS je open source a zdrojový kód je dostupný na platformě GitHub.

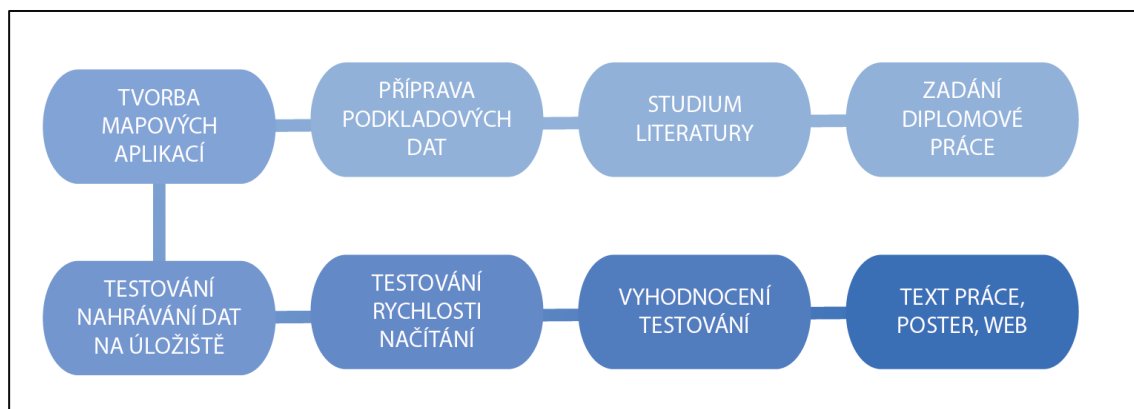
Při testování rychlosti načítání vytvořených mapových aplikací byla použita konzole v prohlížeči Google Chrome. V obou lokalitách, kde testování probíhalo, byl prohlížeč Google Chrome dostupný ve verzi 73. Výstup z konzole byl ukládán ve formátu HAR a pro jeho zpracování, stejně jako pro několik mezikroků v průběhu zpracování bylo užito uživatelských skriptů dostupných na platformě GitHub. Tyto skripty byly napsány v jazycích Python a Java. Jejich názvy, specifikace a přesný způsob použití jsou uvedeny v kapitolách praktické části.

Zpracování výstupů práce probíhalo v programech Microsoft Excel 2016, který byl využíván pod studentskou licenci Univerzity Palackého a také Adobe Illustrator CS6, který poskytuje zdarma měsíční trial verzi. Text práce byl sepsán v softwaru Microsoft Word 2016. Všechny užití softwary byly instalovány v 64bitové verzi.

Postup zpracování

V první fázi práce byla opatřena data pro vizualizaci ve webových aplikacích. Původním záměrem bylo opatřit data z portálu OpenStreetMap, v průběhu práce se však ukázalo vhodnější pořídit data z projektu OpenMapTiles, který byl popsán výše. Poté byly za účelem demonstrace postupu pro vizualizaci vlastních dat pořízeny další dvě datové vrstvy, které byly následně převedeny do dlaždicové struktury pomocí nástroje tippecanoe v prostředí Docker. V další fázi byly tvořeny případové studie, popisující tvorbu webových aplikací užívajících technologii rastrových či vektorových dlaždic ve vybraném prostředí.

Postup při tvorbě aplikací nebyl jednotný a je podrobně popsán v kapitole 5. Po vytvoření aplikací bylo provedeno testování rychlosti nahrávání dat na různá úložiště a poté již bylo přistoupeno k testování aplikací z pohledu jejich výkonnosti. Oba druhy testování probíhaly na dvou různých místech s odlišnou rychlostí připojení k internetu, aby mohl být popsán vliv rychlosti připojení na testované postupy. Výsledky práce tak kromě vytvořených webových aplikací tvoří jejich srovnání jak z hlediska času přípravy aplikace, tak také rychlosti jejich načítání. V závěru byl sepsán text diplomové práce, zhotoven poster a vytvořeny webové stránky, na kterých jsou výsledky práce přístupné.



Obr. 1 Postup zpracování diplomové práce.

3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

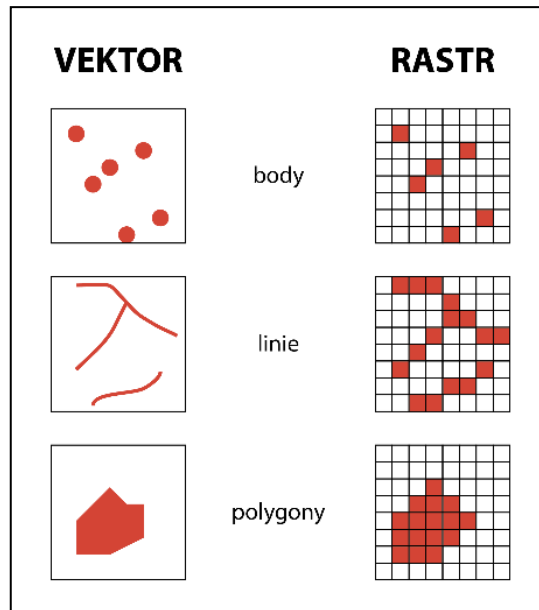
Následující dvě kapitoly popisují teoretická východiska problematiky zkoumané v práci. První z nich se věnuje rozdílu mezi rastrovou a vektorovou reprezentací dat a následně možnostem jejich přenosu po síti World Wide Web. Kapitola 4 popisuje technologii rastrových i vektorových mapových dlaždic a zmiňuje se o rozdílech mezi oběma přístupy. Na závěr této kapitoly jsou představena technologická řešení pro poskytování mapových dlaždic jak z pohledu serveru, tak z pohledu klienta.

3.1 Vektorová a rastrová reprezentace dat

Geografická data užívaná v geografických informačních systémech se podle použitého prostorového datového modelu dělí na vektorová a rastrová. Oba druhy se od sebe zásadně liší v mnoha aspektech a nelze je srovnávat. Ze samotné podstaty způsobu reprezentace dat ale vychází také tvorba mapových dlaždic a bez správné definice vektorové a rastrové reprezentace dat není možné uchopit ani zkoumanou problematiku.

V rastrové reprezentaci musí být již předem definován prostor, který budou vytvořená data pokrývat. Tento prostor je následně rozdělen na pole obvykle čtvercových buněk. Výjimečně se používá také tvar trojúhelníku a šestiúhelníku, vždy ale s dodrženým kritériem homogenity tvaru a velikosti buněk. Nepravidelná dělení prostoru se při konstrukci rastrové reprezentace nepoužívají (Tuček, 1998). Veškerá geografická variabilita je pak vyjádřena přiřazením atributů k těmto buňkám. Buňky se někdy nazývají také pixely (zkratka pro picture elements, obrazové prvky). V některých publikacích je rastrová reprezentace dat přirovnávána k pokládání dlaždicové podlahy na plochý povrch. Rastrové buňky takto pokryjí požadovanou oblast a rastr bývá popisován jako příklad teselace odvozené ze slova pro mozaiku (Longley, 2016). Tuček (1998) zmiňuje, že buňky jsou neoddělitelně spojené s atributovými hodnotami v nich. Jedna buňka pak vždy nese pouze jednu hodnotu atributu a všechny detaily proměnlivosti uvnitř buněk se ztrácejí. Parametry rastrových buněk je tak vždy před jejich tvorbou potřeba dobře zvážit, aby nedošlo k přílišné generalizaci dat. V opačném případě zase hrozí redundance dat, která se projevuje především rostoucí velikostí na diskovém úložišti.

Ve vektorové datovém modelu jsou geografické prvky reprezentovány jako body, linie a polygony. Znázorňuje se poloha bodových objektů, lineární struktura liniových objektů a hranice ploch. Každý bodový prvek tvoří dvojice souřadnic, linie a polygony pak jejich uspořádaná posloupnost. V topologickém smyslu je bod vnímán jako bezrozměrný objekt a nazývá se uzel (node), liniové propojení mezi dvěma uzly se pak nazývá hrana (edge). Uzly se spojují výhradně rovnými hranami. Tuček (1998) upozorňuje, že rastrový model může připomínat soustavu stejných ploch, a tedy model vektorový, neobsahuje však právě vrcholy a hrany, které spolu ve vektorové reprezentaci souvisí podle určitých pravidel. Na rozdíl od rastrového modelu, ve kterém je atribut vázán k celé buňce rastru, u vektorového modelu je atribut spojen s každým vektorovým prvkem. Díky tomu nedochází u vektorové reprezentace k primární generalizaci v takové míře, jako je tomu u reprezentace rastrové (Wade & Sommer, 2006). Graficky byl rozdíl mezi rastrovými a vektorovými daty znázorněn na obrázku 2.



Obr. 2: Grafické porovnání reprezentace dat v rastru a vektoru (zdroj: autor).

3.2 Přenos dat ve webové kartografii

Jak popisuje Nėtek (2015), při přenosu dat prostřednictvím WWW a jejich následné vizualizaci lze uplatnit dva přístupy. Starší přístup ukládá data lokálně, zpravidla na stejný server, na kterém se nachází také aplikace, případně na server v přímém dosahu. Modernější přístup využívá webových služeb. V tomto případě jsou data uložena na zcela libovolném serveru, který většinou neposkytuje konkrétní data, ale pouze jejich obraz. Výběr použitého přístupu se většinou liší podle zamýšleného účelu použití dat. V případě, že chce uživatel pouze jednorázově předat data jinému uživateli, či je chce uložit pro pozdější použití, je vhodné použít spíše lokální uložení dat. Zřízení webové služby je žádoucí, chce-li uživatel svá data poskytnout širokému spektru klientů, a má-li zájem o to, aby tito klienti mohli data zobrazovat a dotazovat přívětivým způsobem.

3.2.1 Datové formáty

V následujících sekcích jsou uvedeny nejčastěji užívané formáty rastrových a vektorových dat ve webovém prostředí a následně jsou také definovány a blíže popsány webové služby. Výběr formátů byl učiněn právě s ohledem na četnost užití při přenosu na webu.

RASTROVÉ FORMÁTY

TIFF, GeoTIFF (Tag Image File Format)

Často užívaný formát pro ukládání rastrových prostorových dat. Původně vytvořen jako formát pro skenované soubory. Umožňuje použití ztrátové i bezztrátové komprese. V geoinformatické je více využívána jeho varianta GeoTIFF, která v hlavičce obsahuje informace o souřadnicovém systému souboru. Ve formátu GeoTIFF se často ukládají například letecké měřické snímky.

BMP (Microsoft Windows Bitmap)

Jednoduchý formát pro ukládání rastrové grafiky, který firma Microsoft představila již v roce 1988. Nevyužívá žádnou kompresi. Soubory v tomto formátu jsou ukládány po jednotlivých pixelech, což zvyšuje jejich velikost. Využití tohoto formátu v internetovém prostředí je tímto faktem velmi omezené.

JPEG (Joint Photographic Experts Group)

Název JPEG představuje primárně ztrátový kompresní algoritmus, vžil se ale již i pro název formátu takto komprimovaného souboru. Je určen k ukládání fotografií bez ostrých přechodů v tónu. V prostředí internetu je postupně vytlačován formátem PNG, který za cenu jen mírně vyšší velikosti souboru nabízí bezztrátovou kompresi.

PNG (Portable Network Graphics)

Modernější náhrada formátu GIF. Díky bezztrátové kompresi LZW a všeobecně rostoucí rychlosti internetového připojení se stal nejpopulárnějším formátem v prostředí webu. Jako důležitá vlastnost je oceňována také přítomnost alfa kanálu, díky které může být obrázek ve formátu PNG z části průhledný.

WebP

WebP je formát, představený společností Google v roce 2010. Jeho cílem je být univerzální náhradou k formátům JPG, PNG a GIF. Podporuje animace i alfa kanál, tedy průhlednost. Jeho tvůrci tvrdí, že při použití tohoto formátu je možné docílit snížení velikosti obrázků o zhruba 30 % a snížit rychlost načítání webových stránek o jednu pětinu. Nevýhodou formátu je omezená podpora webových prohlížečů, například Firefox tento formát začal podporovat až v první polovině roku 2019, prohlížeč Safari od Apple jeho podporu zatím neoznámil vůbec. Formát WebP lze využít například pro renderování rastrových dlaždic pomocí TileServer GL. (Michálek, 2018)

VEKTOROVÉ FORMÁTY

Shapefile

Původně proprietární formát firmy Esri, později přijat jako de facto standard. Podporují jej téměř všechny geografické informační systémy. Data jsou vždy uložena ve 3–6 souborech (*.shp, *.shx, *.dbf, *.prj, ...). Jelikož byl formát vyvinut již v devadesátých letech minulého století, kdy webová řešení vůbec neexistovala, není vhodný pro použití při přenosu dat na webu (Nétek, 2015).

GML

Značkovací jazyk, který v roce 2000 uvolnilo konsorcium OGC. Jazyk je také ISO standardem (ISO 19136:2007). Je založen na jazyku XML a slouží mimo jiné jako výměnný formát geografických dat v prostředí internetu. První část jazyka GML využívá tzv. schémat, která popisují, jaká data jsou v souboru uložena (uživatel tak může odkazovat například přímo na kostel, nikoliv na pouhý bod). Druhou část tvoří samotná data (OGC, 2018).

KML

Formát vyvinutý firmou Keyhole, která byla v roce 2004 odkoupena společností Google. Později jej za svůj standard přijalo OGC. Populárním se stal právě díky použití v aplikacích Google Earth a Google Maps. Na rozdíl od formátu GML obsahuje funkci, která po první vizualizaci dat v tomto formátu uloží vizuální složku do mezipaměti a při dalším načtení uživateli tato data zobrazí.

GeoJSON

Vychází z formátu JSON (Java Script Object Notation), což je univerzální datový formát, zpracovatelný v libovolném programovacím jazyku. Zvládá ukládat data ve formě bodu, linie, polygonu, multibodu, multilinie, multipolygonu i kolekce geometrií. Má velmi jednoduchou strukturu a je nezávislý na platformě. S výjimkou desktopového softwaru ArcGIS firmy Esri je dnes již podporován všemi hlavními GIS softwary.

TopoJSON

Extenze formátu GeoJSON, která ukládá také topologii. Oproti formátu GeoJSON neukládá geometrii pro každý objekt zvlášť, ale pro všechny objekty dohromady. Díky tomu dochází k úspoře dat, každá část geometrie se totiž ukládá pouze jednou a daný objekt se na geometrii pouze odkazuje. Zároveň může jediný soubor formátu TopoJSON obsahovat jak linie (například hranice států), tak polygony (plochy těchto států). Bostock (2016) uvádí, že takto může být velikost dat snížena až o 80 %.

3.2.2 Webové služby

Webové (mapové) služby jsou určeny pro sdílení geografických dat v prostředí internetu na principu servisně orientované architektury. Při přístupu k datům skrze webovou službu nepracuje uživatel s vlastními daty, ale pouze s jejich obrazem (Panda, 2005, cit. V Néték, 2014). Některé přínosy webových služeb popisuje Néték (2014).

- Uživatel přistupuje k mapám z různých míst, nemá data fyzicky uložena na svém počítači či serveru.
- Data jsou uložena a spravována centrálně.
- Pro přístup k datům stačí jednoduchá aplikace (tenký klient ve formě webového prohlížeče).

Aby mohla být data poskytnuta, webový server a klient spolu musejí komunikovat. Tato komunikace probíhá pomocí dotazů přes protokol HTTP. Klient volá požadovanou metodu webové služby pomocí dotazu GET a dostává odpověď serveru dle parametrů zadaných v dotazu. Webové služby umožňují také tzv. kaskádování, kdy jedna služba může využívat prostorová data ze služby jiné. Díky tomu mohou být kombinovány vrstvy uložené na různých serverech a vznikají syntetické mapy se širokým využitím (Néték, 2014). Talhofer a Kubiček (2012) dělí webové služby na rejstříkové, mapové, objektové, služby pro přístup ke coverage, služby pro přístup k výškovým datům a služby pro přístup k vrstvám objektů. Pro tuto práci jsou nejdůležitější služby mapové (obdoba rastrových dat) a objektové (obdoba vektorových dat).

WEBOVÉ SLUŽBY A STANDARDY PRO PŘENOS RASTROVÝCH DAT

WMS (Web Map Service)

Je nejrozšířenějším standardem pro sdílení prostorových dat formou webové služby. Jedná se o standard OGC se současně platnou verzí 1.3.0. Dotaz na WMS službu specifikuje vrstvy, které se mají zobrazit, rozsah zobrazovaného území a další volitelné parametry jako měřítko¹ či symbologii. Ta bývá nejčastěji definována pomocí rozšíření SLD (Styled Layer Descriptor), které je také standardem OGC. Odpověď serveru na dotaz je jeden či více georeferencovaných obrázků v požadovaném rastrovém formátu (PNG,

¹ Měřítko určuje webová služba dle hodnot parametrů WIDTH a HEIGHT.

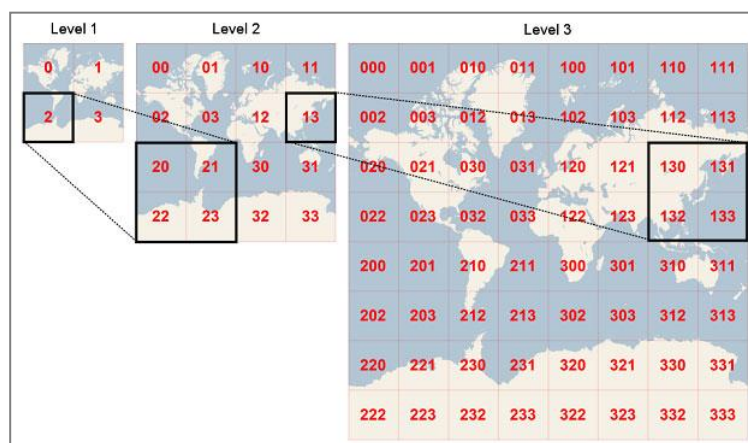
JPEG apod.), které se zobrazí ve webové aplikaci na klientovi. WMS služba umožňuje uživateli také specifikovat průhlednost některých vrstev, díky čemuž je možné využít princip kaskádování, popsany výše. Při každém pohybu s mapou je vygenerován nový obrázek opět dle zadaných požadavků. Operace definované nad WMS jsou následující (OGC, 2018):

- GetCapabilities – vrací metadata dané služby,
- GetMap – vrací obrázek mapy dle požadavků uživatele,
- GetFeatureInfo – vrací informace o vybraném prvku mapy.

WMTS (Web Map Tiled Service)

Standard WMTS se dá označit jako komplementární ke standardu WMS. OGC jej jako svůj standard ale přijala až v roce 2010. Předtím vyvíjela podobný standard, označovaný jako TMS, organizace OSGeo, která provedla první testy standardu v roce 2006. Až o tři roky později byla konsorciem OGC nejdříve testována a poté v dubnu roku 2010 také schválena implementace standardu WMTS. Oba standardy jsou si podobné, zásadní rozdíl mají ovšem v počátku souřadnicového systému². Aktuální verze WMTS má označení 1.0.0.

Zatímco služba WMS generuje mapu dynamicky dle požadavků uživatele, v případě standardu WMTS jsou na straně serveru již předem připravena data ve formě mapových dlaždic (viz Obr. 3). Dlaždicování je technika, která mapové okno rozdělí na několik částí, pro které je mapa získána samostatně. Dlaždice jsou uloženy ve strukturovaných složkách, kde každá složka reprezentuje jednu úroveň přiblížení (zoomu). Všechny tyto složky se pak nacházejí v jedné zastřešující složce, která představuje celou mapovou sadu. V úrovni zoomu 0 je celá zeměkoule pokrytá jedinou dlaždicí, která má zpravidla velikost 256×256 px. Každá další úroveň pak „rodičovskou“ dlaždici dělí na čtyři (2×2) dlaždice o stejné velikosti – rozlišení datasetu na šířku i délku se tedy s každou další úrovní zdvojnásobí. Výhodou WMTS oproti WMS je, že umožňuje ukládat do cache již zobrazené dlaždice. Každá dlaždice se tak načítá pouze jednou a opakované dotazování na stejnou mapu je oproti službě WMS výrazně méně náročné jak na čas, tak na výkon serveru (Adamec, 2016). Služba WMTS má definovány stejné operace, jako WMS, pouze dotaz GetMap je nahrazen dotazem na získání dlaždice GetTile.



Obr. 3: Schéma číslování dlaždic (převzato z Bing Maps Tile System).

² Standard WMTS má počátek souřadnic v levém horním rohu, kdežto standard TMS čísluje dlaždice od dolního okraje směrem nahoru.

WEBOVÉ SLUŽBY A STANDARDY PRO PŘENOS VEKTOROVÝCH DAT

WFS (Web Feature Service)

Pro tvorbu, úpravu a výměnu vektorových dat pomocí protokolu HTTP mezi klientem a serverem byl v roce 2010 přijat standard OGC s názvem WFS. V současnosti je platná verze standardu 2.0.2. Na rozdíl od výše popsaných standardů WFS umožňuje získat informace o konkrétních objektech ve formátu GML. Povinně jsou implementovány tyto metody:

- GetCapabilities – vrací metadata dané služby,
- GetFeature – vrací objekt dle požadavků uživatele,
- DescribeFeatureType – vrací detailní informace o požadovaném objektu.

V základní podobě podporuje služba WFS pouze vizualizaci vektorových dat. Klíčové pro editaci dat je rozšíření WFS-T (Transactional Web Feature Service). To umožňuje úpravu dat pomocí operací:

- InsertFeature – vložení nového prvku,
- UpdateFeature – změna existujícího prvku,
- DeleteFeature – smazání existujícího prvku.

Nevýhodou standardu je neexistující možnost, jak určit měřítko, pro které se geometrie má získat. V praxi tak uživatel vždy obdrží negeneralizovanou geometrii, která může být složitá a její přenos může z důvodu velkého objemu dat trvat dlouho. Tento problém by měl řešit návrh specifikace OGC pro binární GML. (OGC, 2018)

WCS (Web Coverage Service)

WCS je standard OGC, který stejně jako WFS slouží pro výměnu prostorových dat. V srpnu roku 2018 byla vydána verze standardu 2.1. Data se přenáší spolu s metadaty, která umožňují jednodušší interpretaci poskytnutých informací. Standard se využívá pro přenos čtyřdimenzionálních dat, kde čtvrtý rozměr tvoří časová složka. Díky tomu je možné nad daty poskytnutými touto službou provádět časoprostorové analýzy. V základním schématu jsou definovány celkem tři dotazy (OGC, 2018):

- GetCapabilities – vrací metadata dané služby ve formátu XML,
- DescribeCoverage – vrací popis coverage dat (například jejich polohu a časovou platnost),
- GetCoverage – vrací data v podobě coverage, ta lze zobrazit pomocí libovolného formátu.

WPS (Web Processing Service)

Web Processing Service je standardem OGC, který definuje pravidla pro poskytování výpočetních funkcí nad geografickými daty v prostředí internetu. Popisuje mimo jiné, jak se klient může na danou funkci geoprocesingu dotázat a jak má následně vypadat výstup jeho dotazu. Standard neimplementuje konkrétní funkce, ale popisuje obecné rozhraní, jak by měl celý proces proběhnout. Data k provedení libovolné funkce geoprocesingu mohou být dodána buď prostřednictvím internetu, nebo mohou být přímo umístěna na serveru. Standard definuje tři operace (Říha, 2007):

- GetCapabilities – vrací metadata dané služby,
- DescribeProcess – vrací popis funkce včetně podoby vstupu a výstupu,
- Execute – vrací výstupní data po provedení funkce (například Buffer kolem polygonu).

4 MAPOVÉ DLAŽDICE

Koncept mapových dlaždic zmiňuje ve svém článku Goodchild (1990) již v době, kdy ještě webové mapy téměř nebyly používány. Dlaždice přirovnává k systému turistických map, které také zobrazují vždy pouze vybranou oblast ve velkém měřítku na mapovém listu maximálně 2×1 m. Každá další oblast se nachází na jiném listu. Pokud by uživatel chtěl mapy spojit a vytvořit tak mapu většího území, musel by pokládat jednotlivé listy vedle sebe. Vyvinul by tak systém, který se dnešní technologii mapových dlaždic nápadně podobá. Druhou variantou, jak vytvořit mapu většího území, je zmenšení měřítka. Přitom ale vždy musí dojít také ke generalizaci zobrazovaných prvků, a to z důvodu technologických či fyziologických limitů, které znemožňují čtení či vykreslení takových detailů. I tento prvek v dlaždicové technologii zůstal zachován.

Rozvoj webových map nastal až po roce 1993, kdy bylo poprvé umožněno umístit do prostředí internetu obrázek (Peterson, 2003). První mapy zobrazované na internetu tak byly většinou pouze naskenované obrázky umístěné na server, které uživatel mohl zobrazit na libovolné webové stránce. Interaktivní mapa, generovaná dle požadavků uživatele, vznikla poprvé v roce 1994 ve výzkumném centru Xerox Palo Alto a vytvořil ji Steve Putz. Při každém dalším dotazu na server však byla vždy generována celá znovu. Nový obrázek s mapou uživatel viděl až při obnovení celé webové stránky. Tento postup používala také webová mapa společnosti MapQuest, která vznikla v roce 1996 a až do roku 2009 byla nejpopulárnější webovou mapou na světě (Peterson, 2011).

Tato praxe přetrvávala až do roku 2005, kdy společnost Google představila Google Maps. Ty na rozdíl od předchozích online map používaly technologii „Slippy Maps“, která spočívala ve vytvoření mapy předem a jejího rozdělení do mapových dlaždic. Při požadavku uživatele se tak již negenerovala celá mapa znovu, ale pouze se zobrazilo několik obrázků (dlaždic) předem uložených na server. Pokud došlo k posunutí mapy či změně měřítka, stáhly se již pouze ty dlaždice, které v původně zobrazeném území nefigurovaly. Uživatel tak mohl posouvat s rozhraním mapy, přibližovat a oddalovat mapu, která byla vytvořena pouze pomocí HTML a JavaScript. Tuto technologii postupně převzala většina webových stránek věnovaných mapám (Stefanakis, 2015) a začala se objevovat také v mapách na mobilních telefonech (Sample, Ioup, 2010).

4.1 Rastrové dlaždice

Jak již bylo částečně popsáno v kapitole Webové služby a standardy pro přenos rastrových dat, při tvorbě map pomocí rastrových dlaždic se požadované území rozdělí na části a uživatel poté nemusí pokaždé načítat celou vrstvu, ale pouze výřez, který opravdu vidí na monitoru. V následujících podkapitolách je detailně popsán způsob tvorby rastrových dlaždic a technologie s ním spojené.

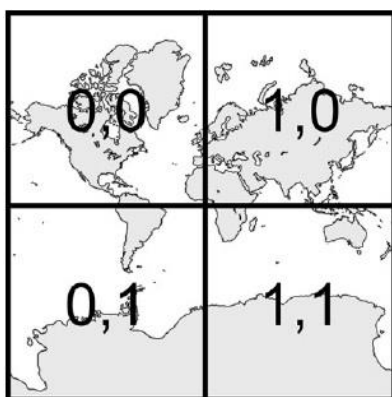
4.1.1 Schéma dlaždic

Ačkoliv uživatel při načítání vrstvy ve formě mapových dlaždic nerozpozná způsob uložení dat a po zobrazení map z Google Maps či Bing Maps s daným středem a úrovní zoomu uvidí stejné území, rozdíl se odehrává na pozadí. Každá sada dlaždic má totiž definováno schéma, pod kterým se ukládá. Jak uvádí Masó a kol. (in Šulc, 2017), schéma popisuje několik parametrů:

- měřítko – velikost jednoho pixelu v metrické soustavě,
- tvar a velikost dlaždice,
- počátek souřadnicového systému (většinou jím bývá levý horní roh),

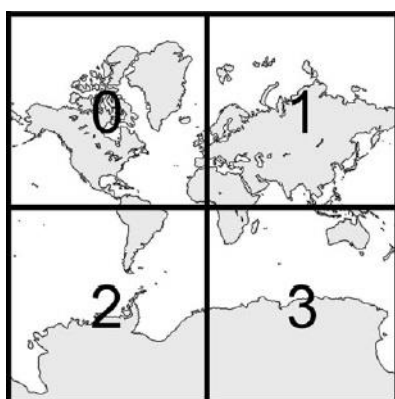
- velikost matice dlaždic (odpovídá počtu dlaždic v matici),
- počet úrovní zoomu.

Stefanakis (2017) kromě toho jako důležitý parametr uvádí také souřadnicový systém mapy. Téměř všechny webové mapy již ale dnes využívají souřadnicový systém Web Mercator (EPSG: 3857)³. Ten byl vytvořen společností Google úpravou originálního Mercatorova zobrazení a představen v první verzi Google Maps. Pro zobrazení dlaždicových map se Web Mercator hodí hlavně proto, že po odříznutí polárních oblastí⁴ se mapa celého světa dá zobrazit jako čtverec. Tento čtverec se pak používá jako dlaždice nulté úrovně. Každá další úroveň pak rozdělí předchozí dlaždici na čtyři další. Největší rozdíl mezi jednotlivými schémata je v jejich počátku a číslování dlaždic. Google své dlaždice označuje párem souřadnic X a Y (viz Obr. 4). Pro získání vybrané dlaždice tak musí kromě jejich souřadnic být známá také úroveň přiblížení, ze které se dlaždice má získat, protože každá další úroveň dlaždic začíná dlaždicí se souřadnicemi 0,0. Počátek číslování se vždy nachází v levém horním rohu.



Obr. 4: Schéma dlaždic Google Maps.

Druhý nejčastěji užívaný systém číslování dlaždic, který implementují například Bing Maps, umísťuje počátek tamtéž, avšak pro označení dlaždic používá algoritmus Quadtree. Ten při každém dělení dlaždic na čtyři následující zachová číslo dělené dlaždice a na další pozici přidá číslo 0–3. Pokud by se tedy dělila dlaždice, která je v první úrovni zoomu označena číslem 0, čtyři dlaždice v následující úrovni přiblížení by měly označení 00, 01, 02 a 03. (Sample, Ioup, 2010)



Obr. 5: Schéma dlaždic Bing Maps.

³ Původně byl souřadnicový systém Web Mercator znám pod kódem 900913.

⁴ Projekce Web Mercator zobrazuje svět pouze do zhruba +/- 85° severní a jižní šířky.

Rozdílně definovány jsou také standardy TMS a WMTS, o kterých byla řeč již výše. Zatímco standard WMTS umožňuje také použití obdélníkových dlaždic, při dodržení standardu TMS musí být užity dlaždice čtvercové. Tím nejdůležitějším rozdílem mezi oběma standardy je orientace svislé osy. U standardu WMTS se y-ová souřadnice dlaždice zvyšuje směrem dolů, u TMS směrem opačným. V praxi se nad dlaždicí se souřadnicemi 2,2 objeví dlaždice se souřadnicemi 2,1 u WMTS, resp. 2,3 u TMS. Třetím podstatným prvkem, ve kterém se oba standardy odlišují je rozdílná velikost dlaždic v různých úrovních přiblížení. Standard WMTS totiž umožňuje použít v každé úrovni zoomu jinou velikost dlaždic. TMS definuje, že všechny dlaždice musejí mít nezávisle na úrovni přiblížení stejnou velikost. (Masó, Pons, Singh, 2010)

4.1.2 Velikost a počet dlaždic

Jak uvádí Zavadil (2013), webové mapy nejčastěji využívají velikost jedné dlaždice 256×256 pixelů. Lze se však setkat také s velikostí 64×64 či 512×512 pixelů, kterou ve své publikaci uvádějí Sample & Ioup (2010). Peterson (2011) odhadl průměrnou paměťovou náročnost pro uložení jedné mapové dlaždice o rozměru 256×256 pixelů na 15 kB a celkový počet dlaždic při užití 20 úrovní přiblížení se pak rovná asi jednomu bilionu. V literatuře se při uvedení úrovně 0, kdy jedna dlaždice pokrývá celý svět, uvádí počet úrovní také roven 21. Takto uložené dlaždice na paměťové jednotce zaujímají zhruba 20 480 terabytů prostoru, každý poskytovatel mapových podkladů ve formě dlaždic tedy musí mít v případě generování dlaždic předem k dispozici obrovské datové úložiště. Velikost rastrové dlaždice může ovlivnit také její barevná hloubka, této problematice se ve své práci věnuje Zavadil (2013).

Tab. 1 Počet dlaždic a jejich velikost při rozměru dlaždice 256×256 px

ÚROVEŇ PŘIBLÍŽENÍ	POČET DLAŽDIC	VELIKOST STRANY v PX
1	4	512
2	16	1 024
3	64	2 048
4	256	4 096
5	1 024	8 192
6	4 096	16 384
7	16 384	32 768
8	65 536	65 536
9	262 144	131 072
10	1 048 576	262 144
11	4 194 304	524 288
12	16 777 216	1 048 576
13	67 108 864	2 097 152
14	268 435 456	4 194 304
15	1 073 741 824	8 388 608
16	4 294 967 296	16 777 216
17	17 179 869 184	33 554 432
18	68 719 476 736	67 108 864
19	274 877 906 944	134 217 728
20	1 099 511 627 776	268 435 456

4.1.3 Metoda cache

Cache je technika, která umožňuje generování map a provádění dotazů napřed, nikoliv přímo po obdržení dotazu a následné uložení výsledků pro další použití. Pokud je dostupná cache, webový server může výsledek klientovi předat okamžitě, bez nutnosti žádání serveru o vykonání požadovaného úkonu. Cache snižuje nároky na GIS server a databázový server, díky čemuž se z ní stává efektivní technika pro zvýšení kvality webové služby. Hlavní výhody vytvoření cache jsou:

- výkon – vytvoření cache snižuje nároky na GIS server a umožňuje rychlejší práci s mapou,
- kartografická kvalita – cache umožňuje poskytnutí kvalitních map, které mohou být zhotoveny již před požadavkem uživatele.

Populární je technika, kdy se do cache umístí pouze to území, u kterého se předpokládá jeho časté zobrazování, a zbytek území se do cache umístí až při jeho prvním zobrazení. Nejčastěji se cache provádí u map, které se často nemění (uliční síť, ortofoto, výškopisné mapy). V případě častých změn mapy pak cache bývá pravidelně aktualizována. Tato aktualizace může být prováděna automaticky. Zmíněné informace platí pro vytvoření cache na straně serveru. Cache je však možné vytvořit také na straně prohlížeče. V tomto případě je prohlížečem využíván obsah, který byl již jednou stažen a nemusí tak být stahován ze serveru podruhé. Díky tomu je také možné snížit nároky na server a rychlost internetu. (Fu, Sun, 2011)

4.1.4 Symbologie

Symbologie dlaždic je při užití rastrového přístupu vytvořena již před generováním dlaždic a její následná úprava znamená nutnost generovat celý set dlaždic znovu. To je jednou z velkých nevýhod mapových dlaždicových podkladů v rastrové podobě. Je-li podklad poskytován ve formě WMTS (viz kapitola Webové služby a standardy pro přenos rastrových dat), může ale uživatel definovat při požadavku GetMap vlastní symbologii, se kterou se data mají vykreslit. Toho je docíleno pomocí webových služeb Styled Layer Descriptor (dále také SLD) a Symbology Encoding (dále také SE), které lze ale využít pouze v případě, že komplementární server WMS k poskytovaným dlaždicím ve formě WMTS umožňuje použití stylu dodaného uživatelem.

SLD rozšiřuje možnosti WMS služeb a umožňuje uživateli použít pro vizualizaci požadovaných dat vlastní symbologii. Tato webová služba vznikla jako standard OGC již v roce 2002. Podstatou jejího použití je vytvoření dokumentu ve formátu XML, pomocí kterého se dokáží vrstvy zobrazované webovou službou spárovat se symbologií, která je v dokumentu popsána dle standardu Symbology Encoding. Původně byly standardy SLD a SE spojeny dohromady, až v červenci roku 2006 byl standard SE osamostatněn od SLD. I přesto však bývá SE často používán uvnitř dokumentu SLD, jako na obrázku 6, který ilustruje použití obou standardů pro vizualizaci polygonové vrstvy se `test_polygon` modrou barvou. Zanoření hodnot standardu SE uvnitř dokumentu SLD lze z obrázku vyčíst na úvodu řádků kódu, který vždy začíná zkratkou daného standardu. Pro stylování se používají tzv. symbolizéry, které jsou vytvořeny zvlášť pro jednotlivé typy geometrií. V tomto případě je užít `PolygonSymbolizer`. Detailně se použití standardů věnovala ve své diplomové práci Morávková (2015).

```

1 <?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>
2 <sld:StyledLayerDescriptor version="1.1.0" xsi:schemaLocation="http://www.opengis.net/sld
3 StyledLayerDescriptor.xsd" xmlns="http://www.opengis.net/sld" xmlns:sld="http://www.opengis.ne
4 xmlns:se="http://www.opengis.net/se" xmlns:xlink="http://www.w3.org/1999/xlink"
5 xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance">
6 <sld:NamedLayer>
7 <se:Name>se_test_polygon</se:Name>
8 <sld:UserStyle>
9 <sld:IsDefault>1</sld:IsDefault>
10 <se:FeatureTypeStyle>
11 <se:Rule>
12 <se:Name>main</se:Name>
13 <se:PolygonSymbolizer uom="http://www.opengeospatial.org/se/units/metre">
14 <se:Geometry>
15 <ogc:PropertyName>the_geom</ogc:PropertyName>
16 </se:Geometry>
17 <se:Fill>
18 <se:SvgParameter name="fill">#0000FF</se:SvgParameter>
19 </se:Fill>
20 </se:PolygonSymbolizer>
21 </se:Rule>
22 </se:FeatureTypeStyle>
23 </sld:UserStyle>
24 </sld:NamedLayer>
25 </sld:StyledLayerDescriptor>

```

Obr. 6 Příklad definice vizualizace polygonové vrstvy dle standardů SLD a SE (převzato z OGC e-Learning).

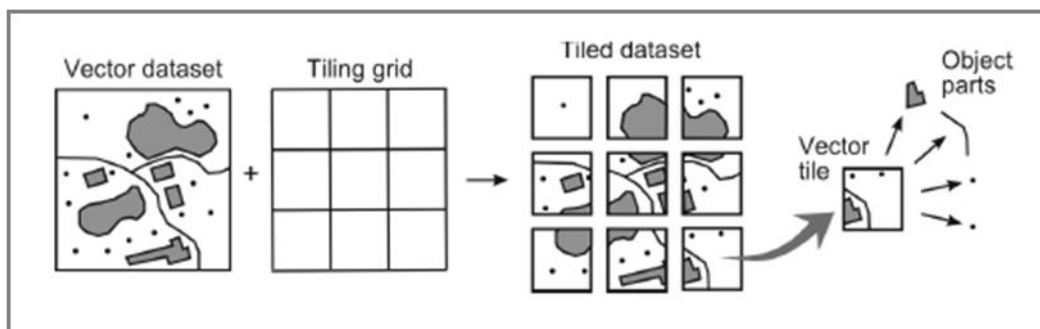
4.2 Vektorové dlaždice

Vektorové dlaždice se na trhu objevily až po rastrových a jejich průkopníkem byl Google, který je v roce 2010 implementoval do mobilní verze Google Maps a v roce 2013 pak také do verze webové (Adamec, 2016). Ačkoliv technika dlaždicování přinesla v nultých letech 21. století revoluci v oboru webových map, měla své nedostatky. Tím hlavním byla potřeba generovat celý set dlaždic znovu při každé změně geometrie dat nebo při úpravě symbologie, která po vygenerování rastrových dlaždic již zůstává neměnná. Uživatelům také přestalo stačit pouhé zobrazení statické mapy a začali po webových mapách požadovat interakci s daty a provádění vlastních prostorových analýz, což rastrové dlaždice neumožňovaly. V případě vektorových dlaždic se na straně klienta nezobrazují obrázky, ale vektorové objekty, uložené na straně serveru, které mohou být prezentovány na klientovi a ten s těmito objekty může dále pracovat. Přenos dat jako objektů je pro interakci s daty na straně klienta téměř nezbytný. Vektorová data samotná jsou ale pouze body, linie a polygony reprezentované svými lomovými body, a nenesou v sobě například informaci o tom, jakým způsobem se mají vykreslovat. Díky jejich podrobnosti je navíc velikost dat často o mnoho větší, než je možné ze serveru na klienta přenést v „rozumném čase“. Tyto a mnohé další jsou aspekty a výzvy poskytování vektorových dlaždic, které jsou v následujících podkapitolách představeny.

4.2.1 Schéma dlaždic

Tvorba dlaždic z vektorových dat je poměrně novou technikou, její základ je ale stejný, jako u rastrových dlaždic. Principem je rozdělení vektorového datasetu na části, přičemž každá z nich odpovídá datům obsaženým na dané dlaždici. Přísluší-li vektorový objekt na několik dlaždic, je takový objekt také rozdělen a každá jeho část je zobrazena na jiné dlaždici. Klient pak zobrazuje pouze ty části dat, které se nacházejí v jeho oblasti zájmu.

Ta se skládá jednak z prostorové lokalizace, ale také z úrovně zoomu, na které se klient nachází. Celý proces tvorby dlaždic je demonstrován na obrázku 7. (Gaffuri, 2012)



Obr. 7 Proces tvorby vektorových dlaždic (převzato z Gaffuri, 2012).

Aby po rozřezání datasetu na dlaždice mohly být na klienta přenášeny pouze ty části dat, které klient požaduje, musejí být stejně jako u rastrového přístupu dlaždice označeny podle schématu. Používaná schémata byla již popsána v kapitole Schéma rastrových dlaždic. Aplikace podporující vektorové dlaždice nejčastěji užívají schéma Google XYZ (Shang, 2015). Číslování vektorových dlaždic pak probíhá úplně stejně jako u rastrových ekvivalentů Google. Například dlaždice v úrovni zoomu 3, sloupci 2 a řádku 5, by tedy byla označena jako 3/2/5.png (případně jiný formát) v případě rastru, a 3/2/5.geojson (případně jiný formát) v případě vektoru. Příklady rastrové a vektorové dlaždice jsou demonstrovány na obrázcích č. 8 a 9.



Obr. 8 Rastrová dlaždice s označením 4/8/4 (převzato z Mapy.cz).

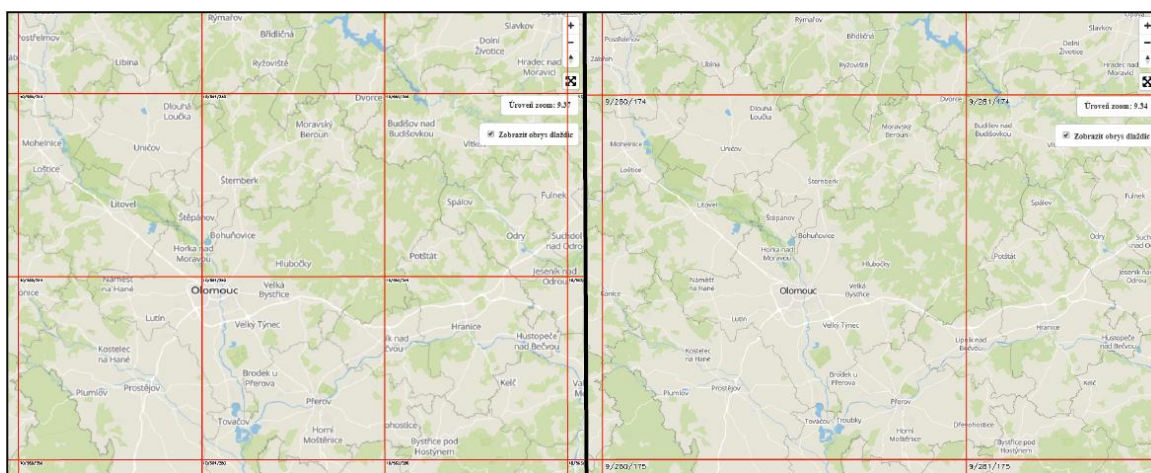
```

"type": "FeatureCollection",
"features": [
  {
    "type": "Feature",
    "geometry": {
      "type": "LineString",
      "coordinates": [
        [
          [
            -1.58203125,
            56.17002298293205
          ],
          [
            18.720703125,
            56.17002298293205
          ],
          [
            18.720703125,
            65.29346780107583
          ],
          [
            -1.58203125,
            65.29346780107583
          ]
        ]
      ]
    }
  }
]

```

Obr. 9 Vektorová dlaždice s označením 4/8/4 (zdroj: autor).

Ačkoliv vektorové dlaždice nejčastěji užívají stejné schéma jako rastrové, tedy Google XYZ, počet načtených dlaždic se při stejných dotazech liší. Často totiž dochází k tomu, že na stejné úrovni přiblížení se při použití vektorových dlaždic zobrazují dlaždice z požadované úrovně zoomu, zatím co při použití rastrového ekvivalentu se již zobrazí dlaždice z následující úrovně, které vzniknou rozdělením původně zobrazených dlaždic na čtyři další. Důvodem tohoto jevu je fakt, že zatím co vektorové dlaždice umožňují plynulé zvyšování úrovně přiblížení, rastrové jsou generovány pouze pro každou z použitých úrovní. Protože v době tvorby rastrových dlaždic bylo možné přibližování pouze po úrovních, tato situace při použití rastrového přístupu není uspokojivě vyřešena. V praxi je vidán jev, kdy se na libovolné úrovni zoomu z oboru celých čísel v okrajových částech monitoru zobrazují dlaždice z jedné úrovně zoomu, a na středu se již vykreslují dlaždice z úrovně následující. Díky tomu může být rozdíl v počtu stažených dlaždic při stejném požadavku na server v závislosti na použité technologii až čtyřnásobný. Ukázka tohoto faktu se nachází na obrázku 10.



Obr. 10 Srovnání zobrazených dlaždic rastr/vektor při stejné úrovni přiblížení (zdroj: autor).

Při téměř totožném zoomu se v levé polovině obrázku, kterou tvoří aplikace užívající rastrové dlaždice, zobrazují již dlaždice z vyšší úrovně zoomu, než je tomu na obrázku vpravo, kde se nachází aplikace s vektorovými dlaždicemi. V tomto konkrétním případě se pro zobrazení stejné oblasti musí stáhnout 20 rastrových dlaždic, ale pouze devět vektorových. Tímto způsobem vektorové dlaždice značně šetří zátěž serveru a zároveň umožňují rychlejší načtení díky menšímu množství stažených dat. K ještě větším rozdílům dochází na vysokých úrovních přiblížení. Například dlaždice z projektu OpenMapTiles zobrazí nejdetailnější geometrii všech prvků na úrovni zoomu 14 a při větším přiblížení se již nová geometrie nenačítá. Uživatel ale může pracovat s definicí vrstev i v zomech 15–21 a zobrazit požadovanou vrstvu nebo popisek až od zoomu 15, nebo i později. U rastrových dlaždic se při přiblížení nad úroveň 14 musí vykreslit další dlaždice v příslušných úrovních, což způsobuje prodlevy v načítání a zároveň vyžaduje dodatečné místo na úložišti, ze kterého se k dlaždicím přistupuje.

4.2.2 Rekonstrukce geometrií

Po přenesení dat musejí být pro práci s daty rozdělené vektorové objekty spojeny zpět, aby byla zachována topologická informace uložená v datech. Tento krok není nutný, pokud uživatel chce data pouze prohlížet, a nikoliv s nimi dále pracovat. Jinými slovy, jsou-li jako vektorové dlaždice poskytována pouze podkladová data, není nutné rekonstrukci geometrií provádět. V případě, že se očekává, že klient se na data bude také dotazovat, musí být rekonstrukce geometrie učiněna. Tímto tématem se ve své diplomové práci zabýval Nordan (2012) a navrhuje pro rekonstrukci čtyři algoritmy. Kromě toho také uvádí, že tyto čtyři postupy se při implementaci rekonstrukce geometrie dají kombinovat.

GLOBAL FEATURE SEARCH

Algoritmus, který předpokládá, že každý objekt má své unikátní ID, kterým je označen, a které je uloženo u každé části objektu. Následně prochází všechny dlaždice přenesené na klienta a hledá objekty, které mají shodné ID. V případě pozitivního nálezu objekty spojí dle jejich geometrie. U bodové geometrie spojování nemusí proběhnout, protože bod bude vždy ležet pouze na jedné dlaždici. Liniové geometrie jsou pak spojeny do geometrie typu Polyline či MultiPolyline, polygonové do geometrií typu Polygon nebo MultiPolygon. Jako velký nedostatek tohoto algoritmu uvádí Nordan (2012) fakt, že algoritmus nezjišťuje, zda existují další dlaždice s objekty shodného ID, a tedy zda již byla rekonstruována celá geometrie objektu.

EDGE POINTERS

Tento algoritmus je založen na principu, kdy je ke každé části objektu připojena také informace o tom, v jakém směru od této části objektu se nachází další část. Směry mohou být pouze čtyři (východ, západ, sever, jih) a díky tomu nedochází k velkému nárůstu velikosti dlaždic. V případě, že objekt na dané dlaždici končí, informace o pokračování objektu je rovna nule. Tento algoritmus zajišťuje, že každý objekt bude rekonstruován celý. Jeho negativem je větší zatížení serveru a také větší velikost přenášených dlaždic.

CENTRAL FEATURE REGISTRY

Dalším řešením rekonstrukce geometrií je centrální registr objektů. Při jeho použití se klient po objevení nového objektu na některé z přenesených dlaždic dotáže v registru, na kterých dlaždicích se tento objekt nachází. O tyto dlaždice pak klient přímo požádá server. Tento postup nijak nezvětší velikost dlaždic, na druhou stranu vyžaduje nalezení způsobu vytvoření a údržby registru s jednotlivými objekty. Nevýhodou této metody je také nutnost

generování všech dlaždic již před spuštěním aplikace, aby bylo možné přidat do registru informaci o tom, na kterých dlaždicích se každý z prvků nachází.

PROBABILISTIC MATCHING

Možným řešením, jak rekonstruovat geometrii rozdělených subjektů, je také na základě předpokladu. Pokud objekt protíná hranu dlaždice v určitém místě a vedlejší dlaždice má v tom samém místě také průnik s objektem, dá se usoudit, že tyto části objektu patří k sobě. Tento postup je vhodné zvolit u méně komplexních geometrií, které neobsahují MultiGeometrie, tak aby se nemohlo stát, že nějaký objekt bude opomenut. Výhodou této metody je nenáročnost na server, nevýhodou je neschopnost zajistit stoprocentní správnost při spojování dat.

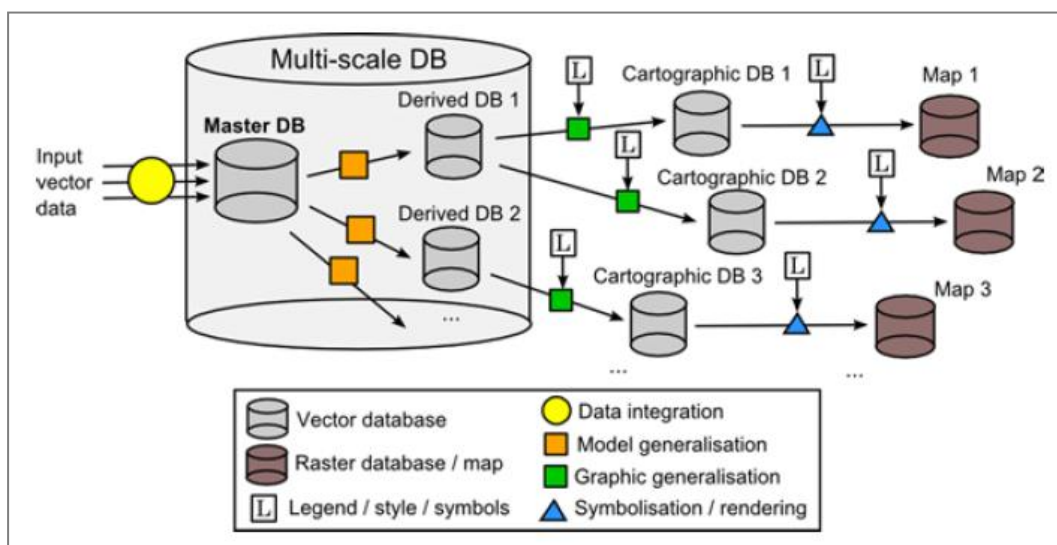
4.2.3 Generalizace

Generalizace se dá definovat jako výběr, grafické zjednodušení a zevšeobecnění objektů v mapě ovlivněné účelem, měřítkem mapy a vlastním předmětem kartografického znázorňování. Dělí se na grafickou, u které dochází pouze k vizuální změně kartografického znaku (například pokud se tři polygony budov spojí v jeden znak reprezentující budovy) a konceptuální, kde dochází také ke změně reprezentovaného jevu (pokud se polygony budov změni na znak znázorňující zastavěné území, či město). Na webových mapách jsou většinou používány oba druhy generalizace, přičemž častěji předchází konceptuální generalizace té grafické.

Generalizace probíhá na rastrových i vektorových dlaždicích, přístup k ní je však u obou technik rozdílný. Zatímco u rastrových dlaždic se generalizace provádí pouze za účelem optimalizace náplně mapy, u vektorových dlaždic hraje roli také rychlost načítání, kterou ovlivňuje složitost geometrií zobrazovaných prvků. Cílem generalizace na vektorových dlaždicích tak je přenos dat v rozlišení, které umožní snížení velikosti přenášené dlaždice. Tomuto procesu se říká také progresivní přenos dat a ve svých příspěvcích se mu věnovali Bertolotto (2001), Gaffuri (2011) nebo Corcoran (2011). Gaffuri (2011) navrhuje jako neoptimálnější způsob použití generalizace u vektorových dat vytvoření několika vektorových databází odvozených z hlavní databáze, které budou svým obsahem odpovídat různým měřítkovým úrovním (viz Obr. 11). Při dotazu klienta na zobrazení vektorových dat pak budou dlaždice vytvořeny z dat v databázi, která je určena pro požadovanou úroveň přiblížení. Zároveň bude na straně klienta probíhat grafická generalizace, na jejímž konci bude spojení dat s vybraným stylem a jejich zobrazení v mapě. Zátěž způsobená generalizací se tak rozloží jak na server, na kterém se díky předgenerování vektorových databází s různou úrovní podrobnosti provede konceptuální generalizace, tak na klienta, kde proběhne generalizace grafická. Nevýhodou této metody je nutnost při úpravě dat změnit geometrii ve všech předgenerovaných databázích.

Druhým způsobem, jakým je možné provést generalizaci vektorových dat pro jejich rychlejší zobrazení, je tzv. dynamická generalizace. Při použití této techniky jsou data generalizována až po požadavku na jejich zobrazení a jsou předávána z jediné vektorové databáze. Pro generalizaci se využívá automatizovaných postupů, jako je například Douglas-Peuckerův algoritmus, Visvalingamův algoritmus, či algoritmus Bend simplification (Taraldsvik, 2012). Bertolotto (2007) popisuje dynamickou generalizaci jako velmi náročnou z důvodu nedostatečnosti obecných pravidel generalizace. Shang (2015) dodává, že dynamická generalizace může přinést nekonzistenci v topologii a geometrii prvků. Většina autorů, kteří se generalizací nad vektorovými dlaždicemi ve svých článcích

věnují, se shoduje, že dynamická generalizace je příliš náročná na zpracování a vykreslení mapy na požadavek klienta je pomalejší, než je současný uživatel ochoten tolerovat.



Obr. 11 Architektura vektorových databází pro generalizaci (převzato z Gaffuri, 2011).

4.2.4 Formáty

Formáty používané pro přenos vektorových dat na webu byly již popsány v kapitole 3.2.1. Ze zmíněných formátů se pro vektorové dlaždice nejčastěji užívají GeoJSON a TopoJSON. Jejich srovnání (společně s prostorovou indexovací službou) provedl ve své práci Adamec (2016). Stejný autor zmiňuje také binární formát Mapbox Vector Tile (dále také mvt), který se v současnosti pro poskytování vektorových dlaždic hojně používá. V roce 2015 oznámila na svém blogu podporu formátu Mapbox Vector Tile také společnost Esri, s tím že se nechystá vyvíjet vlastní formát pro vektorové dlaždice (Turner, 2015).

Mapbox Vector Tile je otevřený formát postavený nad Google Protocol Buffers, což je na jazyku a platformě nezávislý mechanismus pro serializaci strukturovaných dat (Mapbox Vector Tile Specification, 2019). Přípona souborů obsahující vektorové dlaždice v tomto formátu je mvt. V současnosti je platná verze formátu 2.1. Dlaždice jsou uspořádány dle schématu Google v souřadnicovém systému Web Mercator (EPSG: 3857). Geometrie jednotlivých objektů jsou uloženy vůči počátku každé dlaždice a zároveň platí, že souřadnice geometrií musí být typu integer. Objekty mohou mít geometrii typu:

- Unknown – úmyslně vytvořený prostor pro libovolnou geometrii, kterou se vývojář rozhodne implementovat,
- Point – geometrie typu Point a MultiPoint,
- LineString – geometrie typu LineString a MultiLineString,
- Polygon – geometrie typu Polygon a MultiPolygon.

Formát Mapbox Vector Tile je specifický také tím, že ukládá geometrie objektů s malým přesahem přes hranice dlaždice. Tím je vytvořen efekt, kdy objekty po vykreslení působí, jako by nad nimi byla provedena rekonstrukce geometrií, i když ve skutečnosti jsou geometrie stále rozděleny. Výsledkem je rychlejší zobrazení požadovaných dat v mapě, což je vhodné především při použití specifikace pro podkladové mapy. Nad načtenými daty ale není možné provádět žádné analýzy, protože původní geometrie mohly být rozděleny. V internetových diskusích byla probírána také možnost provést

rekonstrukci geometrií nad dlaždicemi v tomto formátu pomocí jednoho z algoritmů zmíněných v kapitole 4.2.2, dosud však tento návrh nebyl realizován. (Adamec, 2016)

4.2.5 Symbologie

Možnost měnit symbologii je jednou z hlavních předností vektorových dlaždic. Na rozdíl od rastrového přístupu může totiž vektorovým datům, zobrazovaným na mapě, být přiřazen jejich styl až po požadavku od klienta. To rastrové dlaždice neumožňují. Styl vždy obsahuje odkaz na data, která se podle něj mají vykreslovat, a také pravidla, dle kterých vykreslení proběhne. Pro určení způsobu vizualizace je možné nejen zadat parametry pomocí vybraného jazyka, ale také například zvolit obrázky nebo ikony pro stylování bodových znaků. Za posledních zhruba deset let, kdy vektorové dlaždice získávají na oblibě, vzniklo několik standardů a způsobů pro definici symbologie a její následnou aplikaci na mapová data. Mezi ně se řadí například následující specifikace.

MAPBOX GL STYLES

Tyto styly vznikly jako symbologie ke dlaždicím ve formátu Mapbox Vector Tile a pro jejich použití je nutné mít vektorové dlaždice právě v tomto formátu. Styl je uložen jako JSON objekt se specifickými kořenovými elementy a vlastnostmi (viz Obr. 12).

```
{
  "version": 8,
  "name": "Mapbox Streets",
  "sprite": "mapbox://sprites/mapbox/streets-v8",
  "glyphs": "mapbox://fonts/mapbox/{fontstack}/{range}.pbf",
  "sources": {...},
  "layers": [...]
}
```

Obr. 12 Kořenové elementy stylu ve formátu Mapbox GL Styles.

Detailně jsou přípustné hodnoty kořenových elementů popsány v dokumentaci na stránkách Mapbox (Mapbox Style Specification, 2019). Mapbox ke stylům nabízí také vizuální editor stylů Mapbox Studio Style Editor, který je určen těm, kteří nechtějí ručně upravovat soubor JSON. Styly je možné upravovat také v open source aplikaci Maputnik. Styl může být použit jak ve webových, tak mobilních aplikacích. Zároveň je otevřeným standardem, který mohou přejmout ostatní mapové služby.

CartoCSS

CartoCSS je předchůdcem Mapbox GL Styles. Tento standard byl také vytvořen společností Mapbox, a to v roce 2010. Cílem při jeho tvorbě bylo vytvořit rychlý jazyk, který by fungoval společně s rendererem Mapnik (renderer dlaždic, který v té době Mapbox používal). Vznikl jazyk podobný CSS, který byl ale primárně určen ke stylování statických map. Jeho nevýhodou podle samotných tvůrců je nutnost používat předdefinované konstanty (The end of CartoCSS, 2016). Definice vzhledu vrstvy probíhá podle tzv. symbolizérů, které se liší podle geometrie dat. Pro stylování vektorových map je také zásadním problémem, že ve specifikaci CartoCSS není možné definovat pořadí vykreslování vrstev. Přesto tuto specifikaci dodnes využívají například aplikace TileMill, či Carto.

Geo Style Sheets

Tato specifikace byla jednou z prvních, která umožňovala stylování vektorových map na straně klienta. Byla používána v aplikaci Cartagen, což byl projekt pracovníka z MIT, umožňující vykreslení mapy z dat OpenStreetMap přímo v prohlížeči. Styl požadované mapě byl přidělen právě pomocí souboru Geo Style Sheet s koncovkou .gss. Formát byl založen na JSON a CSS a v přípravě byla také jeho možná konverze na SLD. Zároveň je GSS také skriptovací jazyk. Nikdy se ale neprosadil do žádné z významných mapových knihoven a jeho vývoj již nepokračuje. (Cartagen, 2010)

MapCSS

MapCSS je jazyk pro stylování map z dat OSM, také založený na CSS. V současné době platí verze 0.2. Jeho použití je svázané s tagy z OpenStreetMap. Stejně jako CartoCSS je otevřenou specifikací a umí spolupracovat se sadou nástrojů Mapnik. Obsahuje také funkci eval a příkazy, pomocí kterých lze upravovat vizualizovaná data (MapCSS vs. CartoCSS, 2013). Oproti CartoCSS je v tomto jazyce možné určit pořadí vykreslení objektů.

4.3 Zpracování rastrových/vektorových dlaždic

Poskytování rastrových či vektorových dlaždic předchází několik kroků. Tím prvním bývá často vytvoření dlaždic z vlastních dat, uložených ve vektorovém či rastrovém formátu. Pokud je účelem pouze publikování dat jako podkladových, je možné použít data z OSM a ta konvertovat do požadovaného formátu. Pro publikování je pak použit některý z dostupných mapových serverů. Posledním krokem k zobrazení dat v podobě mapových dlaždic je tvorba aplikace v knihovně, založené většinou na HTML5 a jazyku JavaScript. Nástrojů a knihoven pro provedení výše zmíněných kroků je mnoho a tato práce uvádí pouze ty nejčastěji používané.

4.3.1 Generátory dlaždic

Generátorem dlaždic je software nebo služba, která uživateli umožní vytvořit z vlastních dat mapové dlaždice. První aplikace tohoto typu většinou zvládaly pouze import rastrového obrázku a export dlaždic ve složkové struktuře. Dnes je již možné použít pro generování dlaždic také vektorová data.

Mapbox

Mapbox umožňuje po registraci na webových stránkách tvorbu rastrových i vektorových dlaždic. Vede k tomu několik kroků. Nejdříve musí uživatel nahrát na Mapbox svá data. Mapbox podporuje formáty GeoJSON, JSON či CSV při nahrávání do tzv. Datasetu. Druhou možností je nahrát svá data jako Tileset. V tomto případě jsou z dat při nahrání vytvořeny vektorové či rastrové dlaždice v závislosti na tom, zda je nahrán vektorový či rastrový zdrojový soubor. Podporované formáty pro nahrání souborů jsou GeoTIFF jako rastr, a GeoJSON, CSV, Shapefile, GPX, KML a MBTiles jako vektor. Z rastrových souborů je možné vytvořit rastrové dlaždice ve formátu .png či .jpg (s různou barevnou hloubkou), z vektorových souborů vektorové dlaždice ve formátu UTFGrid, .mvt či .pbf. Blíže je nahrávání souborů do aplikace Mapbox popsáno v kapitole 5.1 (Documentation | Mapbox, 2018).

Mapnik

Mapnik je sada open source nástrojů pro tvorbu mapových dlaždic. Je napsán v C++, publikován pod General Public License a je multiplatformní, je tedy možné jej užívat s operačním systémem Windows, macOS i Linux. Umí číst několik zdrojových formátů.

Nejčastěji je používán s daty uloženými v PostGIS databázi, ale umí číst také Shapefile, TIFF a GeoTIFF, .osm soubory, CSV a formáty, které podporují knihovny GDAL či OGR. Dlaždice na výstupu mohou mít formát PNG, JPEG, SVG či pro dlaždice nepřilíš používané PDF. Symbologie je k dlaždicím připojena pomocí XML, Mapnik ale umožňuje také vytvoření vlastního stylu, a to pomocí nástrojů jako Cascadenik či Spreadnik. Uživatelsky přívětivý způsob změny stylu může být také plugin do QGIS nazvaný Quantumnik (Mapnik, 2018). Tento postup využívá například společnost Mapy.cz, která pro generování dlaždic ve svém základním stylu používá právě jednu z výše zmíněných utilit na tvorbu stylu a nástroj Mapnik.

TileMill

TileMill je projekt vyvíjený do roku 2015 společností Mapbox. Poté byl nahrazen projektem Mapbox Studio, popisovaným výše. Od roku 2016 spadá vývoj TileMill pod skupinu dobrovolných vývojářů. V současnosti je aktuální verze 0.10.1. TileMill lze nainstalovat také na všechny základní operační systémy, tedy jak Windows, tak macOS či Linux. Po instalaci je možné načíst data ve formátech Shapefile, CSV, GeoJSON, KML, GeoTIFF či z databáze PostGIS či SQLite. Primárním výstupem z aplikace jsou dlaždice ve formátu MBTiles, je možné ale exportovat také statickou mapu ve formátu PNG, PDF či SVG. Poslední možností je export Mapnik XML, tedy vytvořeného stylu, který může být následně použit přímo v softwaru Mapnik či v jiných nástrojích, které služby Mapnik využívají. (TileMill, 2019)

MapTiler

MapTiler je software vyvinutý stejnojmennou společností, dříve známou jako Klokan Technologies. Zakladatelem společnosti je Čech Petr Přidal. MapTiler je následovníkem softwaru GDAL2Tiles, který ve své práci testoval Šulc (2017). Může být použit jako desktopová aplikace, ale také na cloudu. Jeho hlavní schopností je rozdělit rastrový obrázek na dlaždice a ty následně publikovat na webu. Na výstupu umožňuje získat dlaždice ve struktuře složek, nebo ve formátu MBTiles či GeoPackage. Výhodou je také možnost dlaždice rovnou nahrát na cloud. Na výběr jsou dvě cloudové platformy – MapTiler Cloud či Google Cloud Storage. Od verze 10, která vyšla na konci roku 2018, umožňuje na vstupu kromě rastrového obrázku použít také vektorová data.

QTiles

Pokud uživatel nechce instalovat software a již vlastní desktopový software QGIS, může dlaždice vytvořit pomocí pluginu nazvaného QTiles. Ten je kompatibilní s verzí QGIS 2.x a umožňuje vytvořit dlaždice přímo z geodat v otevřeném projektu. Uživatel si při exportu dlaždic může nastavit požadované úrovně zoom a také, zda má být export proveden do struktury XYZ či dle standardu TMS. Plugin zvládá také export do některých mobilních formátů, mj. NextGIS Mobile a MBTiles. Exportovat ale umí pouze rastrové dlaždice.

4.3.2 Servery pro poskytování dlaždic

OpenMapTiles Server

Technologie OpenMapTiles nabízí široké spektrum možností, jak poskytnout na webu dlaždicovou mapu. Autorem je firma MapTiler. Celý systém je postaven na open source technologiích. Server se instaluje pomocí kontejneru v prostředí Docker. Po instalaci enginu je spuštěn kontejner s názvem openmaptiles-server. Následně je umístěn soubor s dlaždicemi ve formátu MBTiles do příslušné složky, ze které jsou dlaždice načítány do klientské aplikace. Dlaždice mohou být načítány jako vektorové, ale také jako rastrové díky knihovně Mapbox GL, jejíž použití autoři serveru doporučují. Zároveň po

nainstalování serveru může uživatel dlaždice využít i jako WMTS službu. Adresa služby je uvedena u každého souboru s dlaždicemi po spuštění serveru ve webovém prohlížeči.

GeoServer

GeoServer obsahuje nástroj GeoWebCache, který plní funkci serveru pro poskytování dlaždic. GeoWebCache je prostředníkem mezi mapovým serverem a mapovým klientem. Nástroj renderuje dlaždice na požadavek klienta a je schopen vykreslit dlaždice jak z dat nahraných uživatelem, tak ze zdrojů v podobě WMS, WMTS či TMS služeb. Výstupní dlaždice mohou být ve formátu PNG, GIF či JPEG. Co se týče vektorových dlaždic, je možné využít balíku OpenGeoSuite, který obsahuje také GeoServer, a pomocí tohoto balíku produkovat vektorové dlaždice ve formátu Mapbox Vector Tile, GeoJSON, či TopoJSON (Adamec, 2016). Na univerzitě v Salzburgu byla vytvořena extenze ke GeoServeru nazvaná gs-mvt, která umožňuje vytvořit vektorové dlaždice ve formátu Mapbox Vector Tile. Po instalaci této extenze lze při požadavku na WMS službu jako parametr zadat „application/x-protobuf“, díky čemuž dojde k poskytnutí dat v podobě vektorových dlaždic (Henneberger, 2015).

TileStache

TileStache je serverová aplikace napsaná v jazyce Python, která funguje jako mapový server pro vytvořené dlaždice. Je šířená pod licencí BSD. Obsahuje modul vector tile, který z různých datových zdrojů (Shapefile, PostGIS, OSM atd.) vytvoří vektorové dlaždice ve formátu GeoJSON, GeoBSON či TopoJSON. Podpora Mapbox Vector Tile nejdříve nebyla implementována, ale ve verzi 1.1 je již možné na výstupu generovat i dlaždice v tomto formátu.

ArcGIS Online

Na platformě ArcGIS je vytvoření dlaždicové vrstvy možné na ArcGIS Online či přímo v desktopové aplikaci ArcGIS Pro. Od verze 1.4 umožňuje ArcGIS Pro publikování vrstvy ve formě vektorových dlaždic přímo z mapového projektu. Dlaždice budou vždy ve formátu Mapbox Vector Tile. Při publikování rastrových dlaždic je uživateli umožněno také vybrat si schéma, podle kterého budou dlaždice označeny a uloženy. Dostupné rastrové formáty jsou PNG ve třech barevných hloubkách, JPEG a formát MIXED, který je vhodné použít v případě, kdy chce uživatel vytvářenou rastrovou vrstvou překrýt jinou dlaždicovou vrstvou.

Norman (2016) srovnal další servery schopné produkovat dlaždice. Seznam nástrojů spolupracujících s formátem MBTiles publikoval Korotkiy (2018) na GitHub.

4.3.3 Klientské knihovny s podporou dlaždic

Aplikace na straně klienta jsou poslední částí potřebnou pro zobrazení interaktivních map, k nimž se řadí také webové mapy využívající technologii rastrových či vektorových dlaždic. Většina webových aplikací využívá některou z knihoven uvedených v tabulce č. 2. Tyto knihovny jsou zpravidla postavené na technologiích JavaScript a HTML5. Taraldsvik (2012) ve své diplomové práci zkonstruoval aplikaci využívající moderní webové technologie a použil knihovnu D3.js. Stejný výběr provedl u podobně zaměřené práce o tři roky později také Shang (2015). Oba u knihovny oceňují především datovou interakci s DOM (Document Object Model) a také vykreslování vektorových dat ve formátu SVG. Všechny mapové knihovny podporují zobrazení rastrových dlaždic ve formě souborů či webové služby WMTS. Implementace nativní podpory vektorových dlaždic se z nejpoužívanějších mapových knihoven zatím dočkal pouze Mapbox GL, ArcGIS API for JS a OpenLayers ve verzi 3.

Tab. 2 Vybrané klientské knihovny a jejich podpora rastrových/vektorových dlaždic

Knihovna	Rastrové dlaždice	Vektorové dlaždice
ArcGIS API for JS	WMTS, PNG, JPG	Mapbox Vector Tile
D3.js	plugin d3-tile (PNG, JPG)	Mapbox Vector Tile, GeoJSON, TopoJSON
Leaflet	pluginy (WMTS, PNG, JPG)	plugin (Mapbox Vector Tile, GeoJSON, TopoJSON)
Mapbox GL JS	WMTS, PNG, JPG	Mapbox Vector Tile
OpenLayers	WMTS, PNG, JPG	plugin (Mapbox Vector Tile, GeoJSON, TopoJSON)
Tangram	PNG, JPG	Mapbox Vector Tile, GeoJSON, TopoJSON

V posledních letech se kladl velký důraz na implementaci funkcionality pro vykreslování vektorových dlaždic. Téměř všechny knihovny, specializující se na mapové aplikace, již nějakým způsobem podporu pro zobrazení podkladových dat jak ve formě rastrových, tak vektorových dlaždic poskytují. Rozdíl je tak pouze v tom, zda je podpora pro daný typ dlaždic poskytována nativně, nebo pouze pomocí pluginu. Knihovny se liší také podporovanými formáty a webovými službami u jednotlivých typů dlaždic.

4.3.4 Software s podporou dlaždic

V této části jsou krátce popsána nejpoužívanější desktopová GIS řešení a jejich podpora mapových dlaždic. Podporou je zde myšlena možnost importu dlaždic a jejich zobrazení ve formě podkladové mapy a také exportu dlaždic v různých formátech. Některé z uvedených informací jsou platné pouze pro vybrané verze softwaru.

ArcGIS for Desktop (ArcMap)

ArcGIS for Desktop umožňuje od verze 10.1 export dlaždic ve formátu Tile Package (.tpk). Při exportu dat do tohoto formátu je možné vybrat schéma dlaždic (Google Maps, ze souboru), nebo si vytvořit své vlastní. Formáty exportu jsou stejné, jako byly uvedeny výše u ArcGIS Online. Co se týče importu dlaždic, nejjednodušší je v softwaru ArcMap otevření zde zmíněného souboru s příponou .tpk. V roce 2017 existovala možnost otevřít vrstvu s dlaždicemi v ArcGIS Online a následně v ArcGIS Desktop, přičemž ArcMap při otevření dlaždic vytvářel soubor .pkinfo. Dle diskusního fóra již ale tato možnost není aktivní (StackExchange, 2018). Další možností je přidat do ArcMap webovou službu WMTS, která je podporována. Vektorové dlaždice nepodporuje software ArcMap vůbec.

ArcGIS Pro

ArcGIS Pro nabízí nejen možnost importu a exportu výše zmíněného formátu Tile Package, ale také vytvoření a zobrazení dlaždic ve formátu pro vektorové dlaždice Vector Tile Package (.vtpk). Takto uložený soubor lze zobrazit i v ArcGIS Online, ostatní softwary ani mapové knihovny ale tento formát nepodporují. Pro konverzi dlaždic ve formátu tpk či vtpk do jiných formátů musí být použit plugin třetí strany tpkutils, dostupný na platformě GitHub. Podporována je stejně jako u softwaru ArcMap také webová služba WMTS.

QGIS

QGIS také zvládá připojit službu ve formátu WMTS. Kromě toho ale má oproti komerčním softwarům společnosti Esri výhodu doplnění funkcionality o pluginy. Použit tak lze například plugin OpenLayers, který umožní zobrazit webové mapy v dlaždicové podobě jako podklad (například OSM). Dostupný je také již výše zmíněný plugin QTiles. Pro

import dlaždic jako podkladových map je velmi výhodné použít plugin Vector Tiles Reader, který umí číst dlaždice ve formátu Mapbox Vector Tile z libovolného serveru, lokálně umístěný soubor MBTiles i dlaždice ve struktuře XYZ. Tento plugin je navíc funkční ve verzích QGIS 2.18 a výše i ve verzi 3.

5 TVORBA APLIKACÍ

Touto kapitolou začíná praktická část práce, která popisuje průběh tvorby testovaných aplikací a následné testování. Na příkladu pěti případových studií je demonstrováno možné použití vytvořených dat v podobě rastrových či vektorových dlaždic. Aplikace vypadají na frontendu (z vizuálního pohledu) stejně či velmi podobně, liší se však použitou technologií a také umístěním datových zdrojů. Hlavním cílem této části práce je detailně popsat tvorbu aplikací a výhody či nevýhody jednotlivých řešení.

5.1 Případová studie 1: Mapbox Studio

Mapbox Studio je webová aplikace, která umožňuje vytvořit mapu užívající technologii vektorových i rastrových dlaždic. Je následovníkem desktopové aplikace Mapbox Studio Classic. V té bylo možné vytvořit design mapy dle specifikace CartoCSS a takto zhotovenou mapu exportovat ve formátu MBTiles. Mapbox Studio již používá nový otevřený standard pro stylování map, Mapbox GL Styles, který je v práci popsán výše. Společnost Mapbox doporučuje pro tvorbu nových map používat Mapbox Studio jako modernější alternativu k Mapbox Studio Classic.

Příprava a nahrávání dat

Prvním krokem ke zhotovení mapy v aplikaci Mapbox Studio je registrace na stránkách společnosti Mapbox. Poté je vhodné si v úvodním menu vytvořit přístupový klíč (access token). Ten slouží k jednoznačné identifikaci projektu a umožňuje například sledování počtu zobrazení vytvořené mapy. Pokud uživatel nepotřebuje své projekty rozlišit, je možné použít také jednotný veřejný klíč. Z detailů účtu je po kliknutí na ikonu v pravém horním rohu rozhraní následně možné přejít do samotné aplikace Mapbox Studio.

Mapbox Studio má tři záložky – Styles, Tilesets a Datasets. Druhá a třetí jmenovaná záložka slouží pro práci s daty, záložka Styles pak obsahuje vytvořené mapy. Chce-li uživatel pouze zobrazit mapu, může využít podkladová data společnosti Mapbox. V případě použití vlastních datových zdrojů je možné data v aplikaci vytvořit, nebo nahrát v některém z podporovaných formátů, které jsou uvedeny v tabulce č. 3. Nevýhodou nahrávání vlastních datových zdrojů je omezení velikosti souboru.

Tab. 3 Přehled podporovaných datových formátů v aplikaci Mapbox Studio

Datový formát	Dataset	Tileset
CSV	ano, do 5 MB	ano, do 1 GB
GeoJSON	ano, do 5 MB	ano, do 1 GB
MBTiles	ne	ano, do 25 GB
KML	ne	ano, do 260 MB s méně než 15 vrstvami
GPX	ne	ano, do 260 MB
Shapefile	ne	ano, jako .zip, do 260 MB
GeoTIFF	ne	ano, do 10 GB

Data lze nahrát jako Dataset, který lze chápat jako kolekci prvků a jejich atributů, a lze jej v aplikaci Mapbox Studio dále editovat, či jako Tileset, který představuje kolekci vektorových či rastrových dat, rozdělených na dlaždice. Aby mohla být data nahraná jako Dataset použita v mapě, musí být po dokončení editace uložena jako Tileset. Byla-li data nahraná jako Tileset, nelze je v prostředí aplikace již editovat. Velikostní omezení však uživatele nutí k tomu, aby data nahrál spíše jako Tileset, tedy ve stavu, kdy už nebudou

dále upravována. Nejsou-li nahrávanými daty mapové dlaždice, při nahrávání jsou data automaticky rozdělena na dlaždice pomocí nástroje tippecanoe. Pro potřeby vytvářené aplikace byly v tomto kroku jako Tileset nahrány tři datové zdroje – soubor dlaždic pro Českou republiku z projektu OpenMapTiles ve formátu MBTiles, datová vrstva letišť ve formátu GeoJSON a vrstva obcí s rozšířenou působností, také ve formátu GeoJSON.

Stylování dat

Po nahrání dat je možné přistoupit ke stylování mapy na záložce Styles. Tato práce využívá ve všech vytvořených aplikacích styl Klokantech Basic od společnosti Klokan Technologies, který je dostupný na platformě GitHub a také na webových stránkách OpenMapTiles v menu Styles. Styl je vytvořen dle specifikace Mapbox GL Styles. Prvním krokem pro propojení stylu s aplikací Mapbox Studio je stažení stylu z platformy GitHub. Složka se stylem obsahuje kromě samotného stylu ve formátu JSON také ikony použité ve stylu ve formátu SVG. Kromě stylu byly staženy také dva fonty ve formátu TTF, které styl využívá – Noto Sans Regular a Noto Sans Bold. Také ty jsou dostupné jako open source na úložišti GitHub.

Po nahrání dat do aplikace Mapbox Studio obdrží každý soubor dlaždic (Tileset) své ID ve formátu „uživatel.ID“, pomocí kterého se na něj lze odkazovat. Nahranému datasetu mapových dlaždic pro Českou republiku bylo vygenerováno ID „francimor94.58advjea“. Toto ID bylo vloženo do staženého souboru style.json na místo datového zdroje (viz Obr. 13). Následně byl v aplikaci Mapbox Studio vytvořen nový styl a nahrán upravený soubor style.json.

```
"sources": {  
  "openmaptiles": {  
    "type": "vector",  
    "url": "mapbox://francimor94.58advjea"  
  }  
},
```

Obr. 13 Vložení ID datové sady do stylu.

Po nahrání se zobrazí mapa vytvořená z dlaždic OpenMapTiles ve stylu Klokantech Basic, kterou lze dále upravovat. Nejdříve byly do aplikace nahrána další potřebná data ke stylu, tedy stažené fonty a ikony. Aplikace sice zvládne zobrazit popisky i před nahráním fontu, z důvodu absence fontů specifikovaných ve stylu však používá jiný font, než bylo požadováno. Styl Klokantech Basic má v základní úpravě nastaveny popisy z textového atributu name:latin, který obsahuje popisy všech prvků ve formě endonym. Aby mapa byla lokalizována v češtině, byl v aplikaci Mapbox Studio změněn u některých vrstev s popisky textový atribut z původní hodnoty na hodnotu name:cs, která obsahuje české popisky. Ačkoliv po nahrání stylu obsahovala mapa i vrstvu airport-label, ve vytvořené mapě chyběly popisy letišť z důvodu absence vrstvy aerodrome_label ve zdrojových datech (viz kapitola Použitá data). Popisy letišť tedy byly doplněny z nahrané vrstvy letišť, stažené z OpenStreetMap, dle stejných pravidel, jako v původním stylu – byly odfiltrovány prvky, u nichž atribut „iata“ neměl žádnou hodnotu, a zobrazování popisků bylo povoleno od hodnoty zoomu 10. Mapbox Studio neumožňuje převzít styl z jiné vrstvy, tak jako je to možné v některých desktopových GIS softwarech, nastavení stylu popisu proto bylo upraveno ručně dle parametrů ve zdrojovém souboru style.json. V aplikaci lze parametry upravit buď prostřednictvím grafického rozhraní, nebo úpravou kódu dle specifikace JSON. Stejným způsobem jako vrstva letišť byla vložena i poslední z nahraných vrstev, hranice obcí s rozšířenou působností. Vrstva byla umístěna nad

vrstvu `admin_country`, obsahující hranice států, a byla jí vytvořena také podobná symbologie jako u státních hranic. Viditelnost vrstvy byla nastavena mezi hodnotou zoomu 8–15. Vytvořený styl byl uložen a publikován jako privátní. Styl je možné uložit také jako veřejný a zpřístupnit jej ostatním uživatelům.

Sdílení mapy

Vytvořená mapa obdrží podobné ID jako data nahraná dříve a pomocí tohoto ID může být umístěna do aplikace napsané v jazycích HTML a JavaScript. Styl vytvořený v rámci diplomové práce má ID „`mapbox://styles/francimor94/cjs5xhdis1zvjlglmsfnhqaax`“. Tento odkaz na mapu je určen pro použití v knihovně Mapbox GL JS, která zvládá vykreslovat vektorové dlaždice díky technologii WebGL. Mapa se inicializuje podobně jako bylo zvykem u rastrových map vytvořením proměnné „`map`“ s objektem „`mapboxgl.Map`“. Ve vlastnostech se pak kromě jiného specifikuje také styl, pomocí kterého se má mapa vykreslit. Do hodnoty parametru `styl` bylo vloženo ID vytvořeného stylu z aplikace Mapbox Studio. Důležitým krokem je také specifikace přístupového klíče, jehož generování bylo popsáno na úvod této kapitoly. Část kódu, která zprostředkovává inicializaci mapy, je k vidění na obrázku 14. Pro zvýšení funkcionality a interaktivity mapy je možné využít také ostatních objektů a metod implementovaných v knihovně Mapbox GL JS. Jejich přehled se nachází v dokumentaci na stránkách společnosti Mapbox.

```
37     mapboxgl.accessToken = 'pk.eyJ1IjoiznJhbmNpbW9yOTQiLCJhIjoieY2p2ycm5tYW5uMGJsM  
38     DRibXNsYjN2cjRscij9.KRw1pD3JU7Pgk1HcKzoBYQ';  
39     var map = new mapboxgl.Map({  
40       attributionControl: false,  
41       container: 'map', // id kontejneru s mapou  
42       style: 'mapbox://styles/francimor94/cjs5xhdis1zvjlglmsfnhqaax', // styl  
43       center: [16.236, 49.803], // úvodní umístění  
44       zoom: 6.5 // úvodní zoom  
45     });
```

Obr. 14 Inicializace mapy vytvořené v aplikaci Mapbox Studio.

5.2 Případová studie 2: TileServer PHP

Druhá z provedených případových studií využívá pro hosting dat vlastní infrastrukturu a open source mapový server TileServer PHP. Předpokladem pro tvorbu mapové aplikace postavené tímto způsobem je vlastnictví webového hostingu a případně také doménového jména, přes které je webový hosting přístupný. V této práci byla aplikace umístěna na hosting společnosti WEDOS Internet, a.s. s doménovým jménem `fpavliceckz.cz`. Data na hosting byla zaslána pomocí protokolu FTP a softwaru FileZilla, který umožňuje výměnu dat mezi webovým serverem a lokálním počítačem.

Příprava a nahrání dat

TileServer PHP tvoří čtyři soubory, které byly staženy z platformy GitHub a nahrány do příslušné složky na webový hosting. Do stejné složky jako tyto soubory byla umístěna také data ve formátu MBTiles z projektu OpenMapTiles, pokrývající Českou republiku. Další dvě užívané datové sady, letiště z OSM a hranice obcí s rozšířenou působností z databáze ArcČR® 500 byla z formátu GeoJSON převedena do formátu MBTiles pomocí nástroje `tippecanoe`. Jak bylo zmíněno výše, tento nástroj nelze spustit přímo na operačním systému Windows, byl proto spuštěn pomocí enginu Docker. Po spuštění terminálu Docker byl nástroj `tippecanoe` nejdříve stažen pomocí příkazu

```
$ docker pull jskeates/tippecanoe
```

a následně mohl být spuštěn příkazem

```
$ docker run -it -v $HOME:/home/tippecanoe jskeates/tippecanoe:latest.
```

Kontejner s nástrojem tippecanoe byl spuštěn s parametrem `-v` s hodnotou `$HOME`, která odpovídá umístění uvnitř složky aktuálního uživatele, v tomto případě cestě `C:/Users/Francimor94`. Tento parametr alokuje prostor v kontejneru a přiřadí jej k určenému umístění. Z tohoto umístění následně může kontejner přistupovat k datům. Data, ze kterých byly dlaždice tvořeny, byla přesunuta do zmíněného umístění a následně byl spuštěn příkaz pro vytvoření dlaždic.

```
bash-4.3$ tippecanoe -o data.mbtiles -L letiste:letiste.geojson -L orp:orp.geojson
```

Příkaz užívá parametr `-o`, kterým je specifikován název a formát výstupního souboru a také parametr `-L`, jehož hodnota má dvě části oddělené dvojtečkou. První část specifikuje jméno vrstvy vytvářené ze souboru, druhá část definuje vstupní soubor. Definovat jméno vrstvy je důležité zejména proto, aby se k vrstvám dalo přistupovat při stylování dat. Vytvořené dlaždice byly uloženy do identické složky jako vstupní data a následně zkopírovány na webový hosting do složky, kde se již nacházely soubory TileServer PHP a soubor s dlaždicemi pokrývajícími Českou republiku z projektu OpenMapTiles. Existuje také možnost oba soubory ve formátu MBTiles spojit do jednoho pomocí příkazu `tilejoin` v nástroji tippecanoe, ta však při tvorbě aplikace nebyla využita. Blíže jsou možnosti příkazu `tilejoin` popsány v kapitole Diskuse.

Stylování dat

TileServer PHP vyžaduje uložení stylu lokálně ve stejné složce, jako se nacházejí soubory serveru a mapová data. Pro vytvoření stylu byl použit webový editor Maputnik, který je dostupný z webové stránky <http://editor.openmaptiles.org>. Po spuštění editoru je uživateli nabídnuto, zda chce začít vytvářet styl zcela od začátku, nebo začít s některým z již existujících stylů. V této práci je užíván styl Klokantech Basic, který byl vybrán jako podklad. Editor stylu nabízí provádět úpravy pomocí grafického rozhraní, nebo přímo úpravou kódu ve formátu JSON.

V editoru byly provedeny dvě úpravy výchozího stylu. Jak bylo zmíněno výše, v užívaných datech z projektu OpenMapTiles schází vrstva `aerodrome_label`, obsahující popisy letišť, která je nahrazena vrstvou z OpenStreetMap. Symbologie vrstvy `airport-label`, která je zahrnuta ve stylu Klokantech Basic, ale zůstává stejná, jako ve výchozím stylu, a může být použita i pro vizualizaci vrstvy z dat OSM. Upraveny tak byly pouze parametry, týkající se datových zdrojů. Hodnota parametru `Source` byla změněna z `openmaptiles` na `data`, dle názvu zdrojového souboru, ve kterém se datová vrstva letišť nachází (více o definici datových zdrojů níže). Hodnota parametru `Source Layer` byla změněna z `aerodrome_label` na `letiste`, dle jména vrstvy, které bylo definováno při vytváření dlaždic nástrojem tippecanoe. Druhá úprava spočívala ve vytvoření vrstvy hranic ORP a definici jejich stylu. Pro tyto účely byla zkopírována vrstva `admin_country`, z jejíž symbologie vychází styl vrstvy `admin_orp`. Následně byla vrstva přejmenována, byl nastaven parametr `Source` na hodnotu `data` a parametr `Source Layer` na hodnotu `orp`,

opět dle názvu vrstvy definovaného dříve. Dále byl smazán filtr, který byl uplatněn v původní vrstvě, minimální zoom byl nastaven na hodnotu 8 a maximální na hodnotu 15. Určena byla také změna šířky linie s měnící se úrovní přiblížení. Toto nastavení bylo provedeno kliknutím na symbol sumy u parametru Width, změnou výchozí hodnoty na šířku 0,5 při zoomu 8 a konečné hodnoty na šířku 4 při zoomu 15. Přímou v kódu byl k šířce linie přidán parametr base s hodnotou 1,4, který určuje tvar funkce hodnoty šířky linie s rostoucí úrovní přiblížení. Rozdíl ve tvaru funkce je možné vidět na obrázku 15.



Obr. 15 Funkce změny šířky linie s úrovní přiblížení (převzato z Mapbox Studio).

Po dokončení úprav byly provedeny na záložce Sources změny v datových zdrojích. Zdroj OpenMapTiles byl ve stylu již vytvořen, ale cesta k datům byla upravena z výchozí hodnoty na skutečnou. Byl také přidán druhý zdroj s hodnotou ID data a s URL směřujícím k souboru data na webovém hostingu. V záložce Style Settings pak byly nastaveny URL adresy směřující na složky s fonty a ikonami, použitými ve stylu. Tyto složky byly vytvořeny v dalším kroku. Takto upravený styl byl stažen ve formátu JSON. Výsledná podoba části stylu, definující umístění zdrojových dat, fontů a ikon se nachází na obrázku 16.

```

"sources": {
  "openmaptiles": {
    "type": "vector",
    "url": "http://fpavlicek.cz/dp/mapy/tileservers-php/tileservers-php/?czech-republic.json"
  },
  "data": {
    "type": "vector",
    "url": "http://fpavlicek.cz/dp/mapy/tileservers-php/tileservers-php/?data.json"
  }
},
"sprite": "http://fpavlicek.cz/dp/mapy/tileservers-php/style/sprite/",
"glyphs": "http://fpavlicek.cz/dp/mapy/tileservers-php/style/fonts/{fontstack}/{range}.pbf",

```

Obr. 16 Definice zdrojových dat, ikon a fontů pro použití s TileServer PHP.

Na rozdíl od aplikace Mapbox Studio, kde byly potřebné fonty nahrány ve formátu TTF, hostování stylu lokálně vyžaduje fonty jako křivky ve formátu PBF. Ty byly staženy ze stránek openmaptiles/fonts na platformě GitHub. Fonty ve správném formátu se zde nacházejí ve větvi gh-pages, nikoliv ve větvi master, jak jsou uživatelé zvyklí. Po stažení ve formátu zip byly soubory s křivkami rozbaleny a uloženy do složky fonts. Použitý styl zahrnuje opět pouze jedinou ikonu ve formátu SVG, která byla umístěna do složky

sprites. Všechny vytvořené soubory, tedy styl ve formátu JSON, složka s fonty a složka s ikonami byly vloženy do složky style, která byla nahrána na webový hosting do stejného adresáře jako vstupní data a soubory TileServer PHP.

Sdílení mapy

Mapa byla stejně jako v předchozím případě zobrazena pomocí jednoduché aplikace napsané v html a JavaScriptu. Oproti mapě s daty hostovanými na stránkách Mapbox zde není potřeba používat přístupový klíč. V parametru styl je vyplněna cesta směřující ke stylu ve formátu JSON, uloženém ve složce style. Zbývající parametry byly nastaveny stejně jako u předcházející aplikace. Posledním krokem pro zveřejnění mapy bylo povolení sdílení zdrojů z jiné domény, tzv. CORS požadavků. CORS (Cross-origin resource sharing) je mechanismus, díky kterému může aplikace běžící na doméně přistupovat ke zdrojům, které se nacházejí na jiné doméně. To by bez povolení nebylo možné, protože prohlížeče nativně z důvodu bezpečnosti mezidoménové požadavky nepovolují (MDN, 2019). Povolení požadavků bylo provedeno odkomentováním následující části kódu v souboru .htaccess, který je jedním ze čtyř souborů, jež jsou součástí TileServer PHP.

```
# Option: CORS header for cross-domain origin access to all data
<ifModule mod_headers.c>
    Header set Access-Control-Allow-Origin *
</ifModule>
```

Po otevření aplikace v prohlížeči a nahlédnutí do vývojářské konzole se může stát, že je v některých úrovních zoomu hlášena chyba o neúspěšném přístupu k dlaždicím. To je způsobeno tím, že jsou užívány dlaždice pouze pro Českou republiku, a především na monitorech s úhlopříčkou přes 19" mohou v okrajových částech monitoru data chybět. V aplikaci využívající TileServer PHP se tento problém nedá vyřešit jinak než užitím dlaždic z projektu OpenMapTiles, pokrývajících celou Evropu, či zakoupením vlastního výřezu dat, který obsahuje i dlaždice ležící z části či zcela mimo Českou republiku. Podrobněji se tomuto problému věnují případové studie užívající zdrojová data ve složkovém uložení.

5.3 Případová studie 3: TileServer GL

Tato studie vyžívá k vizualizaci open source server TileServer GL, také od společnosti Klokan Technologies. Na rozdíl od předcházejícího serveru je TileServer GL napsán v jazyce JavaScript. Server běží v enginu Docker, který při publikování aplikace funguje v pozadí a komunikaci k němu nejčastěji přesměrovává webový server na, například nginx. TileServer GL byl vytvořen proto, aby existoval nástroj, který je schopný renderovat na požadavek klienta rastrové dlaždice z dat OpenMapTiles a stylu ve formátu Mapbox GL Styles. Protože je daleko mladší aplikací než výše používaný TileServer PHP, užívá pro svůj běh novějších technologií jako Node.js či v práci použitý Docker.

Příprava a nahrání dat

Pro spuštění TileServer GL byl použit engine Docker, který byl nainstalován v balíčku Docker Toolbox. Ten obsahuje také grafické uživatelské rozhraní k Dockeru, Kitematic. Nejjednodušším způsobem, jak TileServer GL spustit, je právě v tomto rozhraní vyhledat a spustit kontejner TileServer GL. Po stažení se kontejner spustí a je připraven k použití. V dalším kroku uživatel umístí svůj datový extrakt OpenMapTiles do nabízené složky na cestě C:/Users/<název uživatele>/Dokumenty/Kitematic/tileservers-gl/data. Tato složka

je kontejnerem užívaná jako tzv. Volume, což je místo v lokálním souborovém systému, které je sdíleno s kontejnerem. Propojením této složky s kontejnerem je docíleno umístění prostorových dat do složky kontejneru s názvem data. Následně lze v softwaru Kitematic otevřít webový prohlížeč na portu, kde TileServer GL běží. Tento způsob spuštění však lze použít pouze pro poskytnutí jediného datového souboru ve dvou předem definovaných mapových stylech. Pro všechny aplikace, které mají zobrazovat více datových souborů najednou v uživatelsky definovaných mapových stylech, musí být použit dále popsáný postup.

Spuštění TileServer GL s pokročilejším nastavením vyžaduje vytvoření konfiguračního souboru ve formátu JSON. Ten definuje umístění dat, uživatelských stylů, fontů a ikon a také samotné styly, ve kterých se data mají vykreslovat. Konfigurační soubor pro vytvořenou aplikaci se nachází na obrázku 17.

```
{
  "options" : {
    "paths" : {
      "root" : "",
      "fonts" : "fonts",
      "styles" : "styles",
      "mbtiles" : "mbtiles"
    }
  },
  "styles" : {
    "klokantech-basic" : {
      "style" : "klokantech-muj.json",
      "tilejson" : {
        "bounds" : [12.08477, 48.54292, 18.86321, 51.06426]
      }
    }
  },
  "data" : {
    "v3" : {
      "mbtiles" : "czech-republic.mbtiles"
    },
    "orple" : {
      "mbtiles" : "data.mbtiles"
    }
  }
}
```

Obr. 17 Konfigurační soubor pro TileServer GL.

V úvodní části konfiguračního souboru se definuje umístění vyžadovaných souborů. Parametr root je ponechán prázdný, protože cesta ke konfiguračnímu souboru je specifikována až při spuštění kontejneru s TileServer GL. Další tři parametry specifikují umístění fontů ve složce fonts, stylů ve složce styles a dat ve formátu MBTiles ve složce mbtiles. Sekce věnující se stylům je popsána v následující kapitole. Poslední a nejdůležitější sekci, obsaženou v konfiguračním souboru, je sekce data, ve které jsou specifikovány datové zdroje. Aplikace načítá dva soubory s vektorovými dlaždicemi ve formátu MBTiles. Prvním, s identifikátorem v3, je extrakt z OpenMapTiles pro Českou republiku, druhým, s identifikátorem orple, jsou data obsahující hranice obcí s rozšířenou působností a letiště z OpenStreetMap. Proces tvorby těchto dat byl popsán v kapitole 5.2. Konfigurační soubor byl pojmenován „config.json“ a umístěn na stejnou úroveň, jako složky fonts, styles a mbtiles. Jméno konfiguračního souboru nelze změnit,

protože po spuštění kontejneru TileServer GL je ve specifikované složce hledán právě soubor s tímto názvem.

Po vytvoření popsané struktury byl kontejner s TileServer GL stažen pomocí příkazu

```
docker pull klokantech/tileserver-gl
```

a následně spuštěn příkazem

```
docker run -it --restart always -v //c/Users/Francimor94/tileserver-gl:/data -p 8080:80 klokantech/tileserver-gl
```

Tento příkaz má několik proměnných. Parametr „it“ přikazuje enginu Docker, aby vytvořil pseudo terminál, přes který bude engine komunikovat s kontejnerem. Parametr „restart“ s hodnotou always specifikuje, že kdykoliv se kontejner z nějakého důvodu zastaví, má se sám znovu spustit. Parametr „v“ určuje složku, která má být používána jako složka data v kontejneru (v té se musí nacházet soubor config.json). Poslední parametr „p“ definuje port, na kterém má být kontejner přístupný.

Stylování dat

Pro vykreslování dat v TileServer GL byl s malými úpravami použit styl, vytvořený pro použití v TileServer PHP. Část tvorby stylu je oproti TileServer PHP neměnná. Liší se způsob specifikace datových zdrojů a také umístění fontů a ikon. Parametr URL u každého ze zdrojů není vyplněn adresou, ale řetězcem "mbtiles://{ID zdroje}". ID zdroje je uvedeno v konfiguračním souboru a v tomto případě mají ID hodnoty "v3" a "orple". Stejně jako u datových zdrojů, také u fontů a ikon není uváděna celá URL adresa, ale pouze cesta k požadovaným znakům v definovaném fontu a formátu PBF, tedy "{fontstack}/{range}.pbf". Pro použití ikon byly staženy soubory ve formátu JSON a PNG, které obsahují ikony pro styl Klokantech Basic. Pokud by uživatel užíval vlastní ikony, lze soubory pro použití ikon vytvořit po instalaci balíčku spritezero-cli pomocí npm. Tento nástroj po specifikaci vstupní složky, obsahující ikony, a názvu výstupní složky vygeneruje soubory v požadovaném formátu.

Každý styl, který má být použit pro vykreslení dat v TileServer GL, musí být specifikován v konfiguračním souboru (viz Obr. 17). Aplikace vytvořená v rámci diplomové práce užívá pouze jediný styl, který byl pojmenován "klokantech-muj.json". Styl je dále definován svým ID, které musí být jedinečné. Poslední specifikovanou hodnotou jsou souřadnice, které uvádí lokalizaci používaných dat. Souřadnice datasetu lze převzít z libovolného GIS software po konverzi do souřadnicového systému WGS 84 (EPSG: 4326) či je lze zjistit na webových stránkách projektu OpenMapTiles.

Sdílení mapy

TileServer GL byl používán na localhostu v podobě Docker kontejneru, běžícího na adrese 192.168.99.100:8080. Hlavní účel instalace a užití TileServer GL bylo generování rastrových dlaždic stylovaných dle specifikace Mapbox GL Styles, které je popsáno v kapitole 5.5. Primární způsob použití TileServer GL je na vlastním serveru či cloudu, kde je TileServer spuštěn v běhovém prostředí Node.js či v enginu Docker. Nejčastěji je před běžící aplikací postaven ještě webový server (Apache či nginx), který funguje jako reverzní proxy a přeměřovává požadavky na aplikaci, běžící na serveru v jednom ze zmíněných prostředí. Návody, jak konfigurovat webový server, se dají nalézt v diskusích na platformě GitHub. Není-li k dispozici žádný webový server, je vhodným způsobem, jak

k aplikaci přistupovat, pronájem stroje na některé z cloudových služeb (např. Amazon, Digital Ocean apod.). Pro tuto práci byl jako příklad instalace TileServer GL na cloudu vybrán Amazon, který nabízí omezené množství služeb zdarma po dobu jednoho roku.

Po registraci na webových stránkách Amazon byl zprovozněn virtuální server, který se označuje jako instance. Byla vybrána instance Amazon Linux 2 AMI, která splňuje požadavky free účtu a je dostačující pro provoz serveru. V následném kroku byl vybrán druh instance t2.micro s jediným procesorem Intel Xeon s frekvencí 2,5 GHz, velikostí paměti RAM 1 GB, kapacitou úložiště 8 GB a operačním systémem Linux. Při následném nastavení virtuálního serveru je stěžejní krok 6, ve kterém jsou otevírány porty pro komunikaci serveru s vnějším prostředím. V této případové studii byl otevřen port 80 pro komunikaci přes protokol HTTP. Vhodné může být také otevření portu 443 pro protokol HTTPS, který zde však nebyl potřeba. Při spouštění instance uživatel definuje klíč, který je později využíván pro přihlášení se k instanci a komunikaci mezi lokálním strojem a virtuálním serverem. Tento klíč je následně stažen a uložen do lokálního počítače. Po stažení následuje spouštění instance, které trvá zhruba tři minuty. Poté je již virtuální server připraven k použití.

K serveru je přistupováno pomocí klíče a protokolu SSH. Operační systémy Linux a macOS většinou již mají předinstalovány klienta, kterého lze k připojení k počítači využít. Na Windows takový klient není, proto byl použit nástroj PuTTY, který je volně ke stažení na webových stránkách www.putty.org. Pro účely připojení k serveru byl stažen soubor `putty.exe` a také `puttygen.exe`. Ten slouží k převodu klíče ze staženého formátu `.pem` do formátu `.ppk`, který nejenže zvládá přejít samotný nástroj PuTTY, ale lze jej využít také pro přenos souborů na server například v klientu FileZilla. Po konverzi klíče v nástroji `puttygen` bylo provedeno připojení k serveru pomocí `putty.exe`. Detailní postup vedoucí k připojení lze nalézt na mnoha webových stránkách.

Po připojení ke stroji následovala instalace engine Docker. Docker na operačním systému Linux lze instalovat pouze stažením balíčku přes příkazovou řádku. Není tedy nutné instalovat Docker Toolbox, jako tomu bylo v případě lokálního počítače s operačním systémem Windows. Instalace softwarových balíčků probíhala pomocí utility `yum`. Pro instalaci Dockeru byly použity následující příkazy:

```
sudo yum update -y
```

pro aktualizaci všech již dostupných softwarových balíčků a

```
sudo yum install -y docker
```

pro instalaci balíčku s engine Docker. Následně byl engine spuštěn pomocí

```
sudo service docker start
```

Konzole by v tomto případě měla odpovědět hláškou:

```
starting cgconfigservice      [OK]
starting docker                [OK]
```

V některých případech (kterým byla i tato studie) se po tomto příkazu služba nespustí a terminál odpoví hláškou:

```
Redirecting to /bin/systemctl start docker.service
```

což většinou znamená, že služba Docker musí být povolena příkazem

```
sudo systemctl enable docker
```

O správném spuštění enginu Docker se následně lze přesvědčit pomocí příkazu:

```
systemctl status -l docker.service
```

který odpoví hláškou Active (running). Poté musí být pro manipulaci s enginem udělena práva konkrétnímu uživateli. Jelikož nebyla před spuštěním instance vytvořena žádná role, uživatel instance se nazýval ec2-user, což je základní název uživatele po registraci na cloud Amazon. Pro udělení práv byl použit příkaz:

```
sudo usermod -aG docker ec2-user
```

Po tomto kroku byl počítač restartován pomocí příkazu `sudo reboot` a následně opět spuštěn. O tom, zda je Docker skutečně aktivní, se lze opět přesvědčit pomocí výše zmíněného příkazu, nebo například zadáním příkazu `docker info` pro vypsání informací o používané verzi enginu.

Pro přenos dat na server lze stejně jako při přenosu dat na hosting využít software FileZilla. Připojení k serveru opět proběhlo pomocí vygenerovaného klíče z nástroje puttygen a protokolu SSH. Po připojení byla na stroji vytvořena složka data, do které byly nahrány složky a konfigurační soubor dle struktury popsané výše v této kapitole. Následně již byl v terminálu nástroje putty spuštěn ve složce data kontejner s TileServer GL pomocí příkazu

```
docker run --restart always -it -v $(pwd):/data -p 80:80  
klokantech/tileservers-gl
```

K běžícímu kontejneru lze přistoupit po zadání veřejné DNS spuštěného serveru, která se nachází v konzoli Amazon v menu Instances. Na stroji běží jediný kontejner, není proto třeba specifikovat port ani složku, ve které se data nachází. Takto nainstalovaný TileServer GL nabízí adresu souboru TileJSON pro každý z definovaných stylů, která je pro zobrazení dat v klientské aplikaci vložena jako hodnota parametru "style" při inicializaci mapy. Protože TileServer GL provádí také rasterizaci na straně serveru, a kromě vektorových dlaždic umožňuje také poskytování dlaždic rastrových, byla instalace serveru na cloud využita k vytvoření dalších testovacích aplikací, které zobrazují rastrové dlaždice ve formátu PNG, resp. WebP. Postup, jak zobrazit rastrové dlaždice v knihovně Mapbox GL, je popsán v kapitole 5.5 v části Sdílení mapy.

5.4 Případová studie 4: Soubory PBF

Dalším ze způsobů, jak publikovat mapu ve formě dlaždic je složka se soubory, které jsou na požadavek zobrazovány. Tento způsob nevyžaduje infrastrukturu v podobě serveru pro vykreslení dlaždic. V rámci studie byly dlaždice pro Českou republiku z projektu OpenMapTiles a také vytvořené dlaždice s vlastními daty extrahovány z komprese MBTiles do souborů ve formátu PBF (Protocol Buffers). Tyto soubory byly následně nahrány na webový hosting, užívaný již u studie 5.2.

Příprava a nahrání dat

Pro extrakci dat byl použit uživatelský skript z platformy GitHub s názvem MBUtil, který je volně dostupný pod licenci BSD. Tento skript je určen pro zabalení dlaždic do formátu MBTiles, resp. pro extrakci dlaždic z tohoto formátu do souborové struktury. Je napsaný v jazyce Python a lze jej spustit v příkazové řádce. Nástroj byl stažen z platformy GitHub ve formátu ZIP a následně rozbalen do složky C:/mbutil. Při jeho spouštění je definováno pouze umístění složky s dlaždicemi ve formátu MBTiles a umístění výstupní složky, kam se mají dlaždice exportovat. Tato složka nemusí existovat, nástroj si ji umí vytvořit sám. Ke spuštění skriptu je potřeba také programovací jazyk Python, který byl již dříve instalován spolu s ArcGIS 10.4. Skript vyžaduje užití verze Python vyšší než 2.6. Extrakce dat byla provedena v příkazové řádce příkazem

```
C:/Python27/ArcGIS10.4/python.exe C:/mbutil/mb-util C:/tiles/czech-republic.mbtiles C:/tiles/pbf-tiles --image_format=pbf
```

kde je nejdříve specifikován programovací jazyk, ve kterém se má skript spustit, následně je definováno umístění skriptu, poté je uveden soubor ve formátu MBTiles, který bude extrahován, a nakonec výstupní složka. Skript takto vygeneruje 15 složek s dlaždicemi, které jsou očíslovány podle nejčastěji užívaného schématu XYZ. Nástroj zvládá také export dle schématu TMS, který má osu Y otočenou o 180° (Y-ová souřadnice dlaždic roste směrem nahoru). Poslední parametr specifikuje požadovaný formát dlaždic na výstupu. Přípustné jsou kromě hodnoty PBF také dlaždice ve formátu PNG, JPG či WebP, které ale na výstupu mají rastrové soubory. Na stejné úrovni jako složky s názvy 0–14, obsahující dlaždice v těchto úrovních přiblížení, je vyexportován také soubor JSON, který obsahuje metadata o datech, ze kterých byla extrakce provedena.

I když to na první pohled není zřejmé, protože vytvořené soubory mají koncovku .pbf, extrahované soubory jsou zabaleny pomocí komprese gzip. Tento druh komprese je nejčastěji používán pro zabalení webového obsahu na straně serveru, který si klient při požadavku na něj sám rozbalí. Mapové dlaždice ale nelze použít v zabalené formě. Rozbalení souboru z komprese gzip je možné provést příkazem na operačním systému Linux, na platformě Windows však příkaz gzip podporován není. Byl proto stažen software Cygwin, který umožňuje vybrané příkazy z platformy Linux užívat také na operačním systému Windows. Příkaz gzip je jedním z předvybraných příkazů, které se v rámci softwaru Cygwin instalují automaticky. Po dokončení instalace se ve složce, kde se nacházejí zabalené dlaždice použije příkaz

```
gzip -d -r -S .pbf *
```

který všechny přítomné soubory ve formátu PBF dekomprimuje z komprese gzip. Soubory však po provedení tohoto úkonu nemají žádnou příponu. Pro navrácení přípony pbf všem souborům s dlaždicemi tak byl postupně ve všech složkách 0–14 proveden příkaz

```
for /d %x in (*) do pushd %x & ren * *.pbf & popd
```

který rekurzivně prochází všechny podsložky a všem souborům, které nemají žádnou příponu, přiřazuje příponu pbf. Takto upravené dlaždice mohou být nahrány na server či webový hosting, odkud k nim může být přístupováno bez použití dalších aplikací. Výhodou této úpravy je, že lze exportovat do formátu pbf a následně nahrát na úložiště dlaždice z libovolného území. Později tak byly k původně exportovaným dlaždicím pokrývajícím Českou republiku přidány také dlaždice z jejího okolí v zomech 6–8 a v zomech 0–5 dlaždice pro celou Evropu. Tím bylo docíleno efektu, kdy se i po oddálení od České republiky stále zobrazují data na celém monitoru. Tento krok není možné s dlaždicemi ve formátu MBTiles provést a je dle autorova názoru velkou výhodou publikování dat ve formě souborů. Postupem popsáným výše byly zpracovány také dlaždice zobrazující obce s rozšířenou působností a letiště.

Stylování mapy

Styl, užívaný v této studii, byl získán stejně, jako styly používané s technologiemi TileServer PHP a TileServer GL. Na rozdíl od ostatních provedených studií tento styl není uložen v souboru JSON, ale nachází se přímo ve webové stránce uvnitř proměnné "style". Ta nejdříve definuje použitá zdrojová data, kterými jsou jako v předchozích případech dvě dlaždicové vrstvy. Podstatným rozdílem je, že parametr "url" v seznamu zdrojů nahradil parametr "tiles", jehož hodnotou je URL adresa složky s dlaždicemi v souborovém formátu, zakončená řetězcem "{z}/{x}/{y}.pbf". Adresa musí být zadána absolutně, včetně protokolu, který webová stránka používá. Aplikace při použití dle hodnoty parametru "tiles" hledá dlaždice právě na této adrese a v případě zadání relativní cesty místo funkční webové adresy by dlaždice nebyly při požadavku nalezeny. Řetězec "{z}/{x}/{y}.pbf" definuje složkovou strukturu a formát, v jakých jsou dlaždice uloženy, a je dlouhodobě používaný u map zobrazujících dlaždice. Písmeno Z udává úroveň přiblížení a písmena X a Y souřadnice mapových dlaždic. Příklad číslování dlaždic je dostupný na webových stránkách společnosti MapTiler (MapTiler, 2018).

Po specifikaci zdrojových dat byla uvedena také URL adresa souborů s fonty. Verze aplikace s dlaždicemi v souborovém formátu používá fonty ve formátu PBF, stejně jako aplikace postavená na TileServer GL či TileServer PHP. Poté již následuje parametr "layers", ve kterém je definován styl jednotlivých vrstev. Až po posledním řádku stylu je ukončena proměnná "style", která je následně využita při sdílení mapy. Uvnitř proměnné se tak nachází i specifikace zdrojových dat a fontů, které styl používá. Úvodní část kódu v proměnné style se nachází na Obr. 18.

```

var style = {
  "version": 8,
  "sources": {
    "openmaptiles": {
      "type": "vector",
      "tiles": ["http://fpavlicek.cz/dp/mapy/cz-pbf/openmaptiles/{z}/{x}/{y}.pbf"],
      "maxzoom": 14
    },
    "orple": {
      "type": "vector",
      "tiles": ["http://fpavlicek.cz/dp/mapy/cz-pbf/data/{z}/{x}/{y}.pbf"],
      "maxzoom": 14
    }
  },
  "glyphs": "http://fpavlicek.cz/dp/mapy/cz-pbf/font/{fontstack}/{range}.pbf",
  "layers": [{
    "id": "background",
    "type": "background",
    "paint": {
      "background-color": "#e8e5d8"
    }
  }], {

```

Obr. 18 Úvodní část proměnné style u aplikace s dlaždicemi PBF.

Sdílení mapy

Oproti Obr. 14 se inicializace mapy mírně liší. Není potřeba zadávat přístupový klíč, protože uživatel hostuje vlastní vektorová data. Styl mapy se nenachází na hostingu Mapbox, ani v souboru, ale v proměnné "style", která je dosazena jako hodnota parametru "style". Tiráž je doplněna v kódu až po inicializaci mapy pomocí metody "AttributionControl". Jelikož mapa používá data OpenStreetMap, musí se odkaz na OpenStreetMap v tiráži objevit. Zbytek kódu je identický jako u ostatních aplikací a využívá některé z metod implementovaných v Mapbox GL API.

5.5 Případová studie 5: Soubory PNG/WebP

Tato studie publikuje dlaždice ve formě rastrových dlaždic, které jsou uloženy v souborové struktuře ve formátu PNG/WebP. Tento způsob byl pro publikaci webových map dlouho používán a webové stránky, věnující se mapám, které dosud neimplementovaly technologii vektorových dlaždic, jej používají dodnes. Dlaždice se většinou tvořily z prostorových dat předem a následně se nahrály na server, odkud byly na požadavek zobrazovány. Cílem této studie bylo vytvořit dlaždice z dat z projektu OpenMapTiles, s vlastním stylem. Tento záměr byl splněn pomocí technologie TileServer GL a uživatelského skriptu dostupného na platformě GitHub. TileServer GL nativně renderuje rastrové dlaždice pouze na požadavek a nemá implementovanou funkcionalitu, pomocí které by bylo možné rastrové dlaždice stáhnout a uložit, proto bylo k tomuto kroku využito skriptu třetí strany.

Příprava a nahrání dat

Úvodní část přípravy dat pro tuto studii je identická s procesem popsáním v kapitole 5.3. Aby mohly být dlaždice staženy, byl zprovozněn Docker kontejner s běžící aplikací TileServer GL a vlastním mapovým stylem na adrese localhostu 192.168.99.100:8080. Poté byl stažen skript pro generování rastrových dlaždic. Autorem skriptu je Chris Bartley ze společnosti CMU CREATE Lab. Skript je napsán v jazyce JavaScript a je spouštěn pomocí běhového prostředí Node.js. Toto prostředí bylo nainstalováno ve verzi 10.15.1. Po stažení byl skript uložen ve složce C:/tiles/tilefetcher. Nejdůležitějším souborem pro

spuštění skriptu je soubor index.js, který se v této složce nachází. Skript byl spuštěn v příkazové řádce z této složky následujícím příkazem

```
C:\tiles\tilefetcher>node index.js --style klokantech-muj --dir c:/tiles
--level 0-14 --host 192.168.99.100 --port 8080 --west 12.08477 --east
18.86321 --south 48.54292 --north 51.06426
```

Příkaz specifikuje nejdříve knihovnu, pomocí které se má příkaz provést a následně zdrojový soubor kódu. Poté je specifikován styl, výstupní složka a úroveň zoomu, ve kterých se mají dlaždice stáhnout. Ty mohou být určeny pomocí rozmezí, jako v tomto případě, výčtem úrovní (například 1, 4, 5, 8), nebo kombinací obou těchto metod. Není-li skript před stažením dlaždic upraven, specifikované úrovně přiblížení musí ležet v rozpětí 0–14. Všechny výše zmíněné parametry jsou povinné, dále už následuje výčet těch nepovinných. V případě studie bylo důležité specifikovat IP adresu, na které běží TileServer GL, a to z toho důvodu, že ve výchozím stavu je tato adresa nastavena na localhost, a v tomto případě byla adresa odlišná. Výchozí port je 8080, tento parametr tedy mohl být v tomto případě vynechán. Čtyři souřadnice v parametrech "west", "east", "south" a "north" udávají území, ze kterého se mají dlaždice stáhnout. Pokud by nebyly specifikovány, dlaždice se stáhnou z území celého světa, a to i přesto, že v tomto území nejsou dostupná data. Pro území nepokrytá daty stáhne skript dlaždice v barvě pozadí mapy. Výstupem po zadání příkazu jsou rastrové dlaždice ve formátu PNG v rozlišení 256×256 px s barevnou hloubkou 32 bitů. Dlaždice jsou pojmenovány a uloženy dle schématu Google v úrovních přiblížení 0–14. Pro generování dlaždic ve formátu WebP byl upraven užívaný skript tak, že v souborech index.js a TileFetcher.js byla na všech místech výskytu přepsán řetězec png na řetězec webp. Proces stažení dlaždic ve formátu WebP byl totožný s postupem pro stažení dlaždic PNG.

Stejně jako v případě dlaždic ve formátu PBF, také u této studie je díky přístupu k jednotlivým dlaždicím možné dlaždicemi pokrýt zcela libovolné území. Při generování dlaždic pouze pro Českou republiku dochází stejně jako u předchozích studií k jevu, kdy na monitorech s úhlopříčkou vyšší než 19" není zobrazované území zcela pokryto daty. Proto byly dodatečně způsobem uvedeným výše staženy také dlaždice z okolí České republiky. Tím bylo docíleno stavu, kdy jsou data na všech monitorech zobrazena v celé šíři. Nevýhodou rastrových dlaždic je, že musí být generovány dlaždice na všech úrovních přiblížení, které jsou zobrazovány. Má-li tedy být možno přibližovat mapu až do úrovně 21, musí být všechny tyto dlaždice pomocí skriptu staženy a následně uloženy na úložiště, odkud je k nim přistupováno. Počet rastrových dlaždic se při zvyšující se úrovni přiblížení stále zvětšuje a již na úrovni 16 pokrývá ČR celkem 887 840 dlaždic. Tento počet se navíc čtyřikrát zvyšuje s každou další úrovní. Z důvodu nedostatečné infrastruktury pro zpracování tak velkého množství dlaždic byly v této práci generovány pouze dlaždice do úrovně zoomu 14, jako v případě vektorových dlaždic. Pouze pro okolí Olomouce byly staženy také dlaždice z úrovní 15–18, které byly následně zobrazovány při testování, popsáném v kapitole 7. Po stažení všech potřebných dlaždic byly dlaždice nahrány na webový hosting, odkud k nim je přistupováno.

Stylování dat

Protože se v této studii pracuje s rastrovými dlaždicemi, stylování dat se oproti předcházejícím studiím značně liší. Neprobíhá totiž při požadavku na dlaždice ale již před ním. Dlaždice používají identický styl jako v případě studie 5.3, tedy styl dle specifikace Mapbox GL Styles. Po jejich stažení již tento styl nelze měnit a při jakékoliv změně stylu

je potřeba generovat celý set dlaždic znovu. Tento fakt je velkou nevýhodou použití rastrových dlaždic.

I přesto, že knihovna Mapbox GL je vyvinuta primárně pro práci s vektorovými dlaždicemi, zvládá zobrazit i jejich rastrový ekvivalent. Používané dlaždice se podobně jako u studie 5.4 specifikují přímo v html souboru s webovou aplikací pomocí proměnné "style". Parametr "type" nyní nabývá hodnoty "raster", parametr "tiles" má opět jako hodnotu plnou URL adresu k dlaždicím, tentokrát zakončenou řetězcem "{z}/{x}/{y}.png/webp" dle používaného formátu dlaždic. Za parametrem "tiles" je nyní použit ještě parametr "tileSize", který je nastaven na hodnotu 256 dle velikosti strany dlaždice v pixelech. Poté již následuje parametr "layers", který specifikuje pouze jedinou vrstvu, výše definované dlaždice. Fonty a ikony nejsou při použití rastrových dlaždic užívány. Proces definování stylu je spolu s inicializací mapy zobrazen na obrázku 19.

Sdílení mapy

Mapa byla publikována velmi podobným způsobem jako u předcházející studie. V proměnné "style" jsou definovány datové zdroje a jediná používaná vrstva ve formě rastrových dlaždic. Úvodní hodnota zoom byla stanovena na 7. Díky tomu, že knihovna Mapbox GL je určena primárně pro práci s vektory, přibližování mapy neprobíhá po jednotlivých úrovních, ale plynule. Dlaždice se na nové úrovni zobrazují vždy při dosažení celé hodnoty úrovně zoom a stejná data by měla být viditelná při úrovni přiblížení 8,1 i 8,9. Z tohoto pohledu by mohlo být efektivnější pro zobrazení rastrových dlaždic použití knihovny, která je k tomu určena, například Leaflet. Z důvodu srovnatelnosti přístupů při plánovaném testování však byly všechny aplikace tvořeny v co možná nejpodobnějším prostředí, což zahrnovalo i použití totožné mapové knihovny.

```
var map = new mapboxgl.Map({
  container: 'map', // container id
  style: {
    "version": 8,
    "sources": {
      "openmaptiles": {
        "type": "raster",
        "tiles": [
          'http://fpavlicek.cz/dp/mapy/cz-png/openmaptiles/{z}/{x}/{y}.png'
        ],
        "tileSize": 256
      }
    },
    "layers": [{
      "id": "dlazdice",
      "type": "raster",
      "source": "openmaptiles",
      "minzoom": 0,
      "maxzoom": 22
    }]
  },
  center: [15.564, 49.803], // počáteční pozice
  zoom: 7 // počáteční zoom
});
```

Obr. 19 Parametr "style" a inicializace mapy s rastrovými dlaždicemi.

5.6 Přehled vytvořených aplikací

V rámci popsaných případových studií bylo vytvořeno celkem osm aplikací. Využity jsou celkem tři úložiště – hosting webové aplikace Mapbox Studio, webový hosting společnosti

Wedos a server využívající cloud Amazon Web Services. Aplikace, které vykreslují vektorové dlaždice, používají ve třech případech ze čtyř komprimovaná data s příponou MBTiles, což je SQLite databáze obsahující vektorové dlaždice ve formátu PBF. Čtvrtá z aplikací přistupuje ke stejným dlaždicím přímo. Rastrové dlaždice používají dva různé formáty, PNG a WebP, optimalizovaný formát pro přenos dat prostřednictvím internetu. Dvě z aplikací využívající rastrové dlaždice přistupují ke dlaždicím uloženým na webovém hostingu, další dvě aplikace generují rastrové dlaždice na požadavek z vektorových dat. Přehled aplikací včetně využívaných formátů dlaždic je uveden v tabulce č. 4.

Tab. 4 Přehled vytvořených aplikací

Číslo	Technologie	Formát dat	Úložiště	Způsob generování
1	Mapbox Studio	MBTiles (PBF)	úložiště aplikace Mapbox Studio	předem
2	TileServer GL	MBTiles (PBF)	cloud Amazon	předem
3	TileServer PHP	MBTiles (PBF)	hosting Wedos	předem
4	složky XYZ	MBTiles (PBF)	hosting Wedos	předem
5	složky XYZ	PNG	hosting Wedos	předem
6	složky XYZ	WebP	hosting Wedos	předem
7	TileServer GL	PNG	cloud Amazon	na požadavek
8	TileServer GL	WebP	cloud Amazon	na požadavek

6 TESTOVÁNÍ NAHRÁVÁNÍ DAT NA ÚLOŽIŠTĚ

Tato práce si kladla za cíl porovnat mimo jiné možnosti umístění dat ve formě mapových dlaždic na různá úložiště. V průběhu práce se ukázalo, že uživatelská přívětivost práce s dlaždicemi závisí na použitém formátu dlaždic a také způsobu jejich uložení. Aby mohly být rozdíly v práci s dlaždicemi popsány na základě změřených hodnot, bylo provedeno testování rychlosti nahrávání dlaždic na vybraná úložiště. Tato kapitola popisuje východiska, přípravu a průběh testování a věnuje se také interpretaci jeho výsledků.

6.1 Příprava a průběh testování

Aby výsledky testování byly srovnatelné, bylo jako vstupních dat užito pouze dlaždic v rozsahu pro Českou republiku bez přidání vrstev ORP a letišť. Byly testovány dlaždice ve čtyřech datových formátech, které jsou užívány také v aplikacích vytvořených jako případové studie. Prvním z testovaných souborů byly vektorové dlaždice ve formátu MBTiles. Druhým souborem vstupních dat byly dlaždice ve formátu PBF, jejichž tvorba byla popsána v kapitole 5.4. Pro aplikaci využívající dlaždice v tomto formátu byly generovány také dlaždice mimo území České republiky, testovaný soubor však z důvodu pozdějšího plánovaného srovnání tvořily dlaždice pouze pro území České republiky s výjimkou dlaždic do úrovně zoomu 5. Po tuto úroveň byly nahrávány dlaždice pro celý svět, a to z toho důvodu, že takto jsou uloženy dlaždice z projektu OpenMapTiles, aby při oddálení mapy nezůstal monitor v oblastech mimo Českou republiku prázdný. Počet dlaždic 74 303, který pokrýval Českou republiku, byl tímto krokem zvýšen na 75 663. Stejná úprava byla provedena v případě rastrových dlaždic ve formátech PNG, resp. WebP, které do testování také vstupovaly. Tyto dlaždice byly generovány stejným způsobem, jako v případové studii popsané v kapitole 5.5. Přehled testovacích dat včetně velikosti a počtu souborů se nachází v tabulce č. 5.

Tab. 5 Data pro testování nahrávání na úložiště

Datový formát	Počet souborů	Velikost dat
MBTiles (PBF)	1	788 MB
PBF	75 663	1,03 GB
PNG	75 663	1,35 GB
WebP	75 663	394 MB

Aby byl v průběhu testování co nejvíce eliminován vliv rychlosti internetového připojení na výsledné hodnoty, bylo testování prováděno na dvou místech s rozdílným připojením. Dle výzkumu společnosti Ookla dosahovala průměrná rychlost pevného připojení v České republice v roce 2017 34 Mbit/s (Schön, 2017). V průběhu testování bylo mnohokrát měřeno připojení rychlosti k internetu na webové stránce společnosti ADSL (ADSL.cz, 2019). První z testovaných míst disponovalo připojením s rychlostí 3–20 Mbit/s, které by se dalo vzhledem ke zmíněnému výzkumu Ookla označit za pomalé. Na druhé testovací lokalitě se rychlost připojení pohybovala v rozmezí 50–200 Mbit/s, což jsou v České republice nadprůměrné hodnoty. Tato lokalita byla označena jako místo s rychlým připojením.

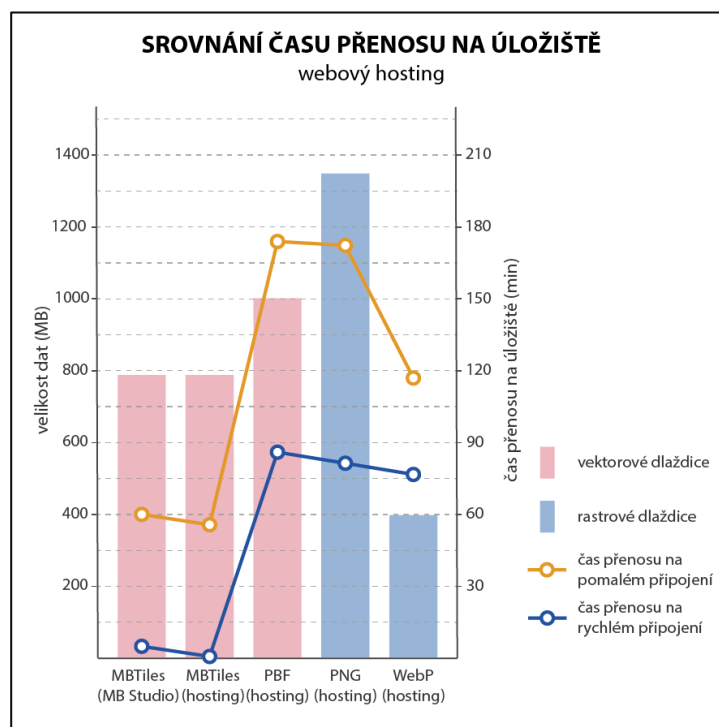
Testovaná úložiště korespondují s umístěním dlaždic v případových studiích. Prvním testovaným úložištěm bylo datové centrum Mapbox. Společnost uvádí, že její úložiště se rozkládá na pěti kontinentech s téměř šedesáti lokalitami a využívá infrastrukturu

Amazon Web Services. Dá se tedy říci, že při nahrání do aplikace Mapbox Studio jsou data uložena na cloudovou infrastrukturu. Druhým úložištěm, kam byla data nahrávána, byl webový hosting společnosti Wedos. Tato firma užívá jako úložiště pro hosting serverový disk typu SAS 600 GB 15k v RAID 6, výrobce používaného disku bohužel není uveden. Třetím testovaným úložištěm bylo úložiště na cloudu Amazon EC2. Za předpokladu užívání bezplatného účtu je uživateli při spouštění virtuálního stroje poskytnuto úložiště o velikosti 8 GB typu SSD, na které byly testované soubory přesouvány. S výjimkou nahrávání dat do aplikace Mapbox, která disponuje vlastním grafickým rozhraním, bylo pro propojení lokálního a cílového počítače užíváno softwarů FileZilla a Altap Salamander.

Všechna měření byla provedena pětkrát na pomalém i rychlém připojení, a prezentován je vždy střední naměřený čas, tedy doba třetího nejrychlejšího měření. Především v případě pomalejšího z testovaných připojení docházelo často také k výpadkům v připojení v podobě několikaminutového přerušení spojení či výraznému poklesu rychlosti připojení na minimálně 10 minut. V těchto případech bylo nahrávání vždy přerušeno a spuštěno znovu. Prezentované časy nahrávání jsou tedy z případů, kdy byla rychlost připojení stabilní.

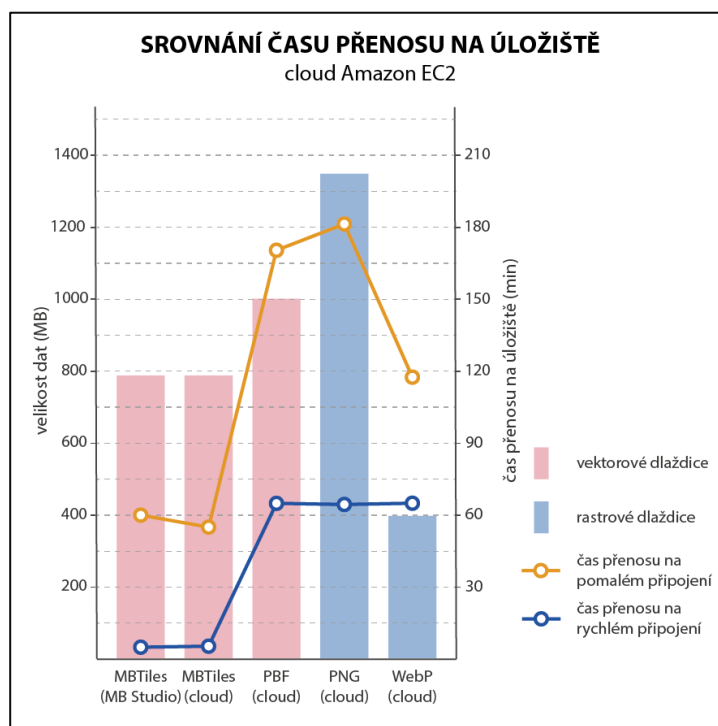
6.2 Výsledky testování

Naměřené hodnoty jsou vyrovnanější, než se před testováním předpokládalo. Hlavním závěrem testování je, že rychlost přenosu dat na úložiště závisí především na množství přenášených souborů, nikoliv na jejich velikosti. Práce s dlaždicemi na disku je díky vysokému počtu souborů velice komplikovaná a jejich komprese a zabalení do formátu MBTiles ji významně usnadňuje nejen při přenosu na cílové úložiště. Rozdíly mezi rychlostí přenosu jsou prezentovány na obrázcích 20 a 21. Oba grafy obsahují pro srovnání kromě časů nahrávání na vybrané úložiště také čas nahrávání souboru s dlaždicemi ve formátu MBTiles na úložiště aplikace Mapbox Studio.



Obr. 20 Srovnání času přenosu na webový hosting.

Na grafu zobrazujícím čas nahrávání dat na webový hosting Wedos lze vidět, že soubor ve formátu MBTiles je nahrán téměř okamžitě. Při nahrávání na úložiště Mapbox Studio dochází po samotném nahrání ještě ke zpracování dat, které trvá na pomalém i rychlém připojení cca pět minut. Tento čas byl v měření zahrnut a je důvodem, proč je nahrávání souboru MBTiles na Mapbox Studio pomalejší než na hosting. Z dat ve složkové struktuře proběhlo nahrání nejrychleji u dlaždic ve formátu WebP, a to především z důvodu jejich malé velikosti oproti dlaždicím ve formátu PNG a PBF. Rozdíl je patrný především u pomalého připojení, u rychlého činil pouze několik minut. Čas nahrávání dlaždic PBF a PNG se dá na obou rychlostech připojení označit za srovnatelný. Je tomu tak i přesto, že dlaždice ve formátu PNG jsou o více než 300 MB větší než dlaždice PBF. Dlaždice ve formátu MBTiles se na pomalém připojení přesouvaly na hosting zhruba 2× rychleji než dlaždice ve formátu WebP, u formátů PNG a PBF byl rozdíl cca trojnásobný. Na rychlém připojení byl rozdíl ještě o mnoho markantnější.



Obr. 21 Srovnání času přenosu na cloudové úložiště.

U přenosu na cloudové úložiště jsou výsledné časy na pomalém připojení téměř shodné s webovým hostingem. Jediným viditelným rozdílem je pomalejší přenos dlaždic ve formátu PNG, který při odesílání na cloud trval v průměru déle než tři hodiny. U rychlého připojení je možné si povšimnout, že data ve formátu MBTiles nebyla přenesena tak rychle, jako v případě webového hostingu. Přenos na cloud trval prakticky totožnou dobu jako v případě Mapbox Studio, kde ale po přenosu dochází ke zpracování dat. Při přenosu dat ve formě složkové struktury na cloudové úložiště nebyly na rychlém připojení již téměř žádné rozdíly. Je možné, že pevný disk používaný na pronajatém stroji dosáhl při přenosu své maximální kapacity v počtu souborů přenesených za vteřinu a hlavním faktorem při přenosu tak nebyla celková velikost dat, ale počet souborů. Dá se konstatovat, že přenos stejných dat ve složkové struktuře trval asi 13× déle na rychlém, resp. 2–3× déle na pomalém připojení než u souboru ve formátu MBTiles.

7 TESTOVÁNÍ VÝKONU APLIKACÍ

Jedním z hlavních cílů této práce bylo provést výkonnostní testování aplikací vytvořených v rámci případových studií. Testování srovnává aplikace z pohledu použitých technologií, místa přístupu k datům, formátu dat i způsobu generování dlaždic. Tato kapitola popisuje přípravu testování a jeho průběh. Testování bylo vyhodnoceno pomocí grafů, tabulek a slovní interpretace naměřených hodnot.

7.1 Příprava a průběh testování

Aby bylo možno hodnotit výkon aplikací, bylo připraveno poloautomatické testování. Inspirací pro způsob testování byl test, který provedl Adamec (2016) za účelem srovnání vektorových dlaždic s prostorovou indexovací službou. Cílem jeho i tohoto testu bylo simulovat způsob, jakým uživatelé zacházejí s mapovou aplikací. Test vychází z předpokladu, že uživatel navštívuje mapovou aplikaci z důvodu, aby zjistil polohu některého z objektů, a po načtení se přibližuje na tento objekt. Jako zkoumaný objekt byla vybrána budova Katedry geoinformatiky. Následuje posun na mapě, díky kterému se uživatel lépe orientuje, kde se daný objekt nachází a může porovnat jeho vzdálenost od jiného zájmového bodu. V poslední fázi mapu oddaluje, aby mohl zobrazit oba objekty najednou. Jako poslední interakce bylo přidáno oddálení o jednu úroveň přiblížení, které slouží pouze pro porovnání s naměřenými daty u předchozí interakce. Seznam všech interakcí při testování, včetně výchozí a konečné úrovně přiblížení, uvádí tabulka č. 6. U všech interakcí byla stanovena doba trvání. Pokud by tento postup nebyl zvolen, všechny interakce by se odehrály skokově a nedošlo by k načítání dlaždic v průběhu interakcí. Trvání interakcí bylo zvoleno tak, aby co možná nejvíce odpovídalo reálné rychlosti, jakou uživatel pracuje s mapou.

Tab. 6 Měřené interakce s aplikacemi

Interakce	Zoom před/po	Trvání (ms)	Zobrazená data
Iniciální načtení	-/6,5	-	Česká republika, dálnice, státní a krajské hranice, lesní plochy, vybrané řeky, popis států a velkých měst
Zoom na katedru	6,5/17	6000	Úroveň ulic, ulice a domy, popis ulic a domů
Posun na náměstí	17/17	1500	Úroveň ulic, ulice a domy, popis ulic a domů
Oddálení 3×	17/14	1500	Viditelná větší část Olomouce, popis ulic a zájmových bodů
Oddálení 1×	14/13	500	Viditelná celá Olomouc, popis několika vybraných ulic a letiště

Testování bylo stejně jako v případě srovnání rychlosti nahrávání dat na úložiště prováděno na dvou lokalitách s rozdílnou rychlostí připojení k internetu. Na obou místech bylo testováno na monitorech o velikosti 22" s rozlišením 1650×1080 px, aby mohly být výsledky srovnány. Rychlosti připojení při testování byly shodné s těmi, které byly uvedeny v kapitole 6.1.

Pro účely testování byly v každé z osmi aplikací vytvořeny čtyři tlačítka. Po kliknutí na každé z nich byla provedena daná interakce. Při testování byly interakce spouštěny postupně tak, jak jsou uvedeny v tabulce č. 6, vždy alespoň s pětivteřinovou mezerou mezi dokončením předchozí interakce a spuštěním následující, aby bylo při zpracování

dat možno bezpečně určit, kdy byl dokončen první z požadavků a kdy spuštěn následující. Výsledky testování byly zaznamenány do konzole prohlížeče Google Chrome. Při testování byla vypnuta cache, aby se všechny dlaždice načítaly pokaždé znovu a také byla zaškrtnuta možnost "Preserve log", která umožňuje zachovat data sesbíraná při předchozích požadavcích. Takto byly při každém měření zaznamenány všechny požadavky odeslané na server při zmíněných pěti interakcích s aplikací. Záznam z konzole byl po dokončení testování exportován ve formátu HAR (HTTP Archive), což je ve skutečnosti soubor ve formátu JSON s detailní statistikou pro všechny prohlížečem vykonané požadavky. Pro každou z aplikací bylo provedeno deset měření na lokalitě s pomalým připojením k internetu a deset měření na lokalitě s rychlým připojením. Z každých deseti měření bylo navíc pět provedeno v ranních (7:30–8:30) a pět ve večerních hodinách (18:00–19:00). Původním cílem bylo provést večerní měření během tzv. „rush-hour“ mezi 19:00 a 21:00, kdy bývá internetové připojení statisticky vytíženo nejvíce (Novak, 2014), to však nebylo možné z důvodu večerního uzavření lokality s rychlým připojením.

Naměřená data byla konvertována z formátu HAR do lépe čitelného CSV. K tomuto kroku byl použit skript z platformy GitHub, jehož autorem je Michio Yamamoto. Skript byl napsán v jazyce Java a k jeho použití je potřeba mít nainstalováno Java Runtime Environment. Spouští se v příkazové řádce ze složky, kde se nachází soubor `har2csv.exe`, pomocí příkazu

```
har2csv --in C:/mereni/mereni1 --out C:/mereni/mereni1.csv
```

Příkaz definuje nástroj, který má být ke konverzi použit a následně cestu ke vstupnímu a výstupnímu souboru. Soubory HAR se při uložení z konzole stáhnou bez přípony, proto vstupní soubor nemá příponu. Výstupní soubor musí disponovat příponou CSV, v opačném případě je uložen jako soubor bez přípony. Skript nefunguje pro soubory s velikostí cca 38 MB a vyšší, což odpovídá tabulce o zhruba 300 požadavcích. V případech, kdy počet požadavků přesahoval tuto hodnotu, byl vstupní soubor rozdělen v textovém editoru na 2–3 části a po exportu do formátu CSV opět spojen. Výstupní soubory byly importovány do tabulkového editoru Microsoft Excel, ve kterém byly vypočítány prezentované hodnoty.

Vytvořená tabulka obsahovala 17 atributů, ve třech případech ale nebyly u atributů vyplněny hodnoty. Pro zpracování byly nejdůležitějšími atributy URL požadavku, čas počátku požadavku, čas trvání požadavku, odpověď serveru na požadavek, typ přijatých dat a velikost přijatých dat. Z dat byly získány pro každou z interakcí informace o času načtení mapy, množství stažených dat, počtu požadavků na server, počtu úspěšných požadavků na server, a průměrné době stahování jedné dlaždice. Časová data byla zpracována s přesností na milisekundy, informace o velikosti stažených dat byla pořizena v bytech a je prezentována v Megabytech. Výsledky měření byly zpracovávány zvlášť pro pomalé a rychlé připojení k internetu a také zvlášť pro měření pořizovaná ráno a večer. Srovnání těchto měření se věnuje následující kapitola.

7.2 Srovnání měření ráno/večer

Prvním z cílů testování výkonu aplikací bylo provést analýzu naměřených hodnot z pohledu jejich rozdílnosti při ranním a večerním měření. Za tímto účelem bylo provedeno navíc dalších 30 měření v obou zmíněných časových horizontech v lokalitě s pomalým připojením. Měřeným subjektem byla pouze aplikace vytvořená na platformě

Mapbox Studio. Z naměřených hodnot byly získány údaje o měřených metrikách po provedení každé z pěti interakcí v obou časových horizontech.

Prvním způsobem, jakým byly naměřené hodnoty porovnány, byl výpočet libovolné střední hodnoty. Byl zvolen medián, a to z důvodu eliminace extrémních hodnot, které se vyskytly u jednotek měření. Pokud by jako analyzovaná střední hodnota byl zvolen průměr, výsledný čas by byl extrémními hodnotami ovlivněn. S výjimkou iniciálního načtení, kde rozdíl mezi mediánem z hodnot naměřených ráno, resp. večer, dosahoval zhruba 39 ms, se však ostatní hodnoty lišily pouze v rámci jednotek ms, v jednom z případů to byly dokonce i desetiny ms. Proto bylo přistoupeno ke statistickému testování, které určilo, zda jsou si oba výběry podobné. Jako počítaná statistika byl zvolen F-test, který srovnává rozptyly obou datových souborů. Pomocí tohoto testu je často určeno, zda se libovolný zásah statisticky významně projevuje v naměřených datech. V tomto případě bylo testováno, zda se měření ve večerních hodinách odlišuje od měření v ranních hodinách. Prvním krokem testování bylo stanovení hypotézy H_0 , která se v případě F-testu stanovuje jako:

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 \quad (1)$$

a říká, že rozptyly obou souborů jsou shodné. Hladina významnosti α byla stanovena na 0,05. Poté byl stanoven počet stupňů volnosti, který je roven:

$$n_1 - 1 \text{ pro } \sigma_1^2, \text{ resp. } n_2 - 1 \text{ pro } \sigma_2^2 \quad (2)$$

kde n je počet měření. Následně byla vypočtena hodnota F jako:

$$\frac{\text{větší z roptylů } (\sigma_1, \sigma_2)}{\text{menší z roptylů } (\sigma_1, \sigma_2)} \quad (3)$$

Poté byla dle tabulek Fisher-Snedecorova rozdělení stanovena kritická hodnota pro F-test, dle příslušné hladiny významnosti ($\alpha = 0,05$). Test se interpretuje pomocí srovnání hodnoty F a kritické hodnoty. Je-li $F > \text{krit. } F$, hypotéza (1) se zamítá a závěr testu zní, že oba zkoumané soubory se na zvolené hladině významnosti statisticky liší. Je-li $F < \text{krit. } F$, hypotéza (1) se nezamítá a závěrem lze konstatovat, že zkoumané soubory se statisticky neliší. F-test byl proveden pro naměřený čas načtení mapy u každé z pěti interakcí a jeho výsledky se nachází v tabulce č. 7.

Z výsledků lze vyčíst, že ve třech případech nebyla hypotéza (1) zamítnuta, protože hodnota $F < \text{krit. } F$. U zbylých dvou měření byla hypotéza (1) zamítnuta. Dle výsledků testu může být řečeno, že zatím co při iniciálním načtení a oddálení není statistický rozdíl mezi hodnotami naměřenými ráno a večer, u zoomu na katedru a posunu na náměstí statistický rozdíl nalezen byl. Při pohledu na data však lze vidět, že rozdíl rozptylu u dat ze zoomu na katedru činí především extrémní hodnoty, které jsou u ranního měření čtyři z třiceti měření. U večerního měření se vyskytuje extrémní hodnota pouze jedna. Tento fakt se opakuje také u posunu na náměstí, kde se více extrémních hodnot vyskytuje ve večerním měření. Tyto extrémy sice ovlivňují rozptyl, ale při pozdějších analýzách výsledků měření nebudou mít vliv, protože prezentován bude medián z naměřených hodnot, díky kterému nedojde ke zkreslení prezentovaných hodnot těmito extrémy. Na

základě výsledků testu bylo rozhodnuto o použití naměřených hodnot nezávisle na době měření.

Tab. 7 Výsledek F-testu

Interakce	Doba měření	Rozptyl	Hodn. F	Krit. F	Závěr
iniciální načtení	ráno	19919,26	1,1227	1,8608	F < krit. F H ₀ se nezamítá
iniciální načtení	večer	22363,49			
zoom na katedru	ráno	23268,92	2,2497	1,8608	F > krit. F H ₀ se zamítá
zoom na katedru	večer	10342,98			
posun na náměstí	ráno	5717,24	1,9861	1,8608	F > krit. F H ₀ se zamítá
posun na náměstí	večer	11354,95			
oddálení 3×	ráno	15793,66	1,0463	1,8608	F < krit. F H ₀ se nezamítá
oddálení 3×	večer	15095,44			
oddálení 1×	ráno	18096,11	1,2082	1,8608	F < krit. F H ₀ se nezamítá
oddálení 1×	večer	14978,32			

7.3 Výsledky testování

Naměřené hodnoty byly zpracovány pro každé měření zvlášť a následně převedeny na střední hodnotu. Za účelem eliminace extrémů v měřeních je prezentovaná hodnota vždy medián z deseti provedených měření. Výsledky jsou prezentovány zvlášť pro pomalé a rychlé připojení k internetu, a to z důvodu přílišné rozdílnosti mezi naměřenými hodnotami.

7.3.1 Srovnání času načtení mapy

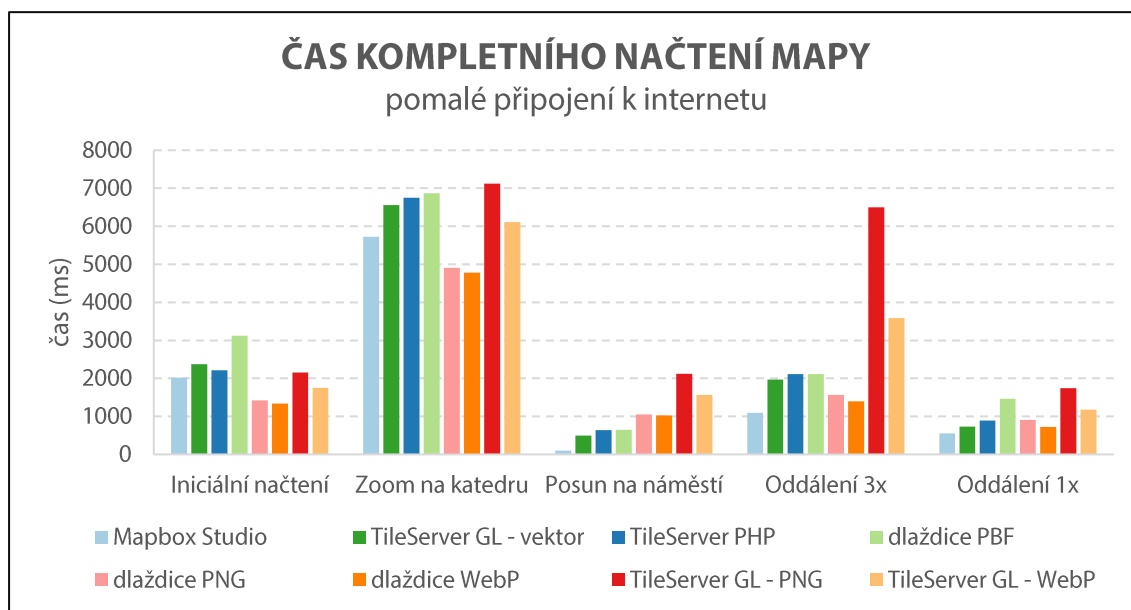
První ze zjišťovaných hodnot byla doba načtení mapy po každém z požadavků. Ta byla definována jako

čas načtení poslední dlaždice – počáteční čas prvního z požadavků,

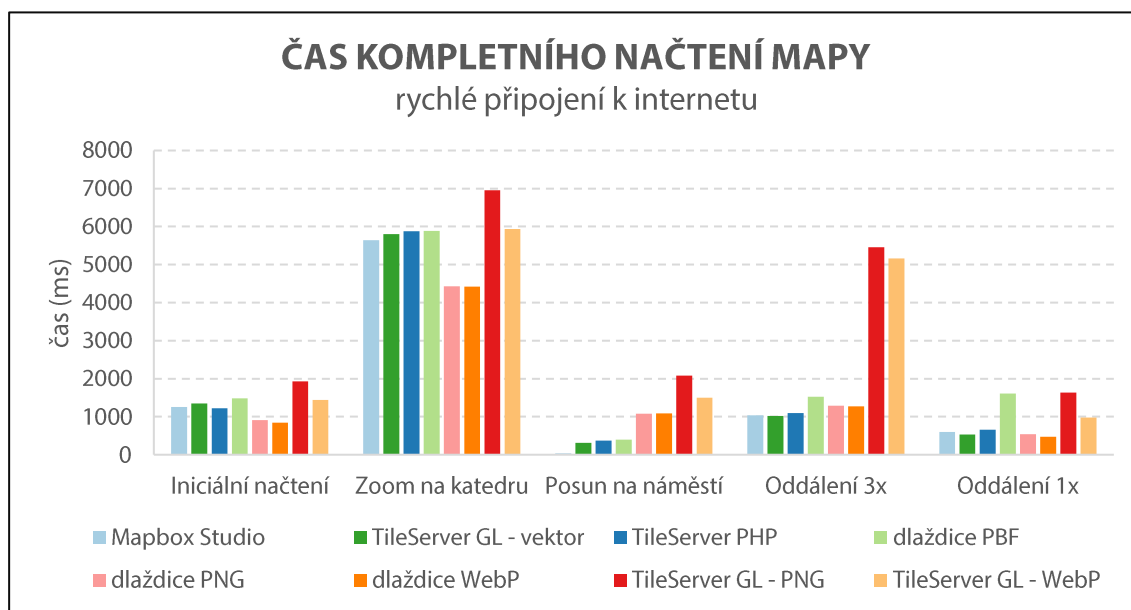
kde je časem načtení poslední dlaždice myšlen čas, kdy byl dokončen poslední z požadavků, nikoliv čas, kdy byla načtena dlaždice, kterou prohlížeč začal stahovat jako poslední. Získané hodnoty, především hodnota ze zoomu na katedru, jsou částečně ovlivněny stanovenou dobou pro vykonání požadavku. Důvod definice doby, po kterou má požadavek trvat, byl popsán výše. Naměřeným dobám z časů načtení mapy se věnují obrázky 22 a 23.

U jediné metriky, která neměla předem stanovenou dobu trvání, tedy iniciálního načtení, byly nejrychlejší aplikace s předgenerovanými rastrovými dlaždicemi. Aplikace s dlaždicemi ve formátu WebP vykazovala jak v případě pomalého, tak i v případě rychlého připojení ještě o trochu lepší výsledky než aplikace s dlaždicemi ve formátu PNG. Rastrové dlaždice generované na požadavek dosahovaly na pomalém připojení při iniciálním načtení zhruba o vteřinu horších časů než předgenerované ekvivalenty. Tato doba však byla stále srovnatelná s časem načtení aplikací s vektorovými dlaždicemi. U rychlého připojení jsou již rastrové dlaždice generované na požadavek nejpomalejší ze

všech měřených aplikací. Předgenerované rastrové dlaždice byly načteny zhruba o 400 ms dříve než aplikace s vektorovými dlaždicemi. U všech měření je při iniciálním načtení kromě mapových dat načítána také knihovna Mapbox GL, její styl a také ikona webu diplomové práce.



Obr. 22 Čas kompletního načtení mapy (pomalé připojení k internetu).



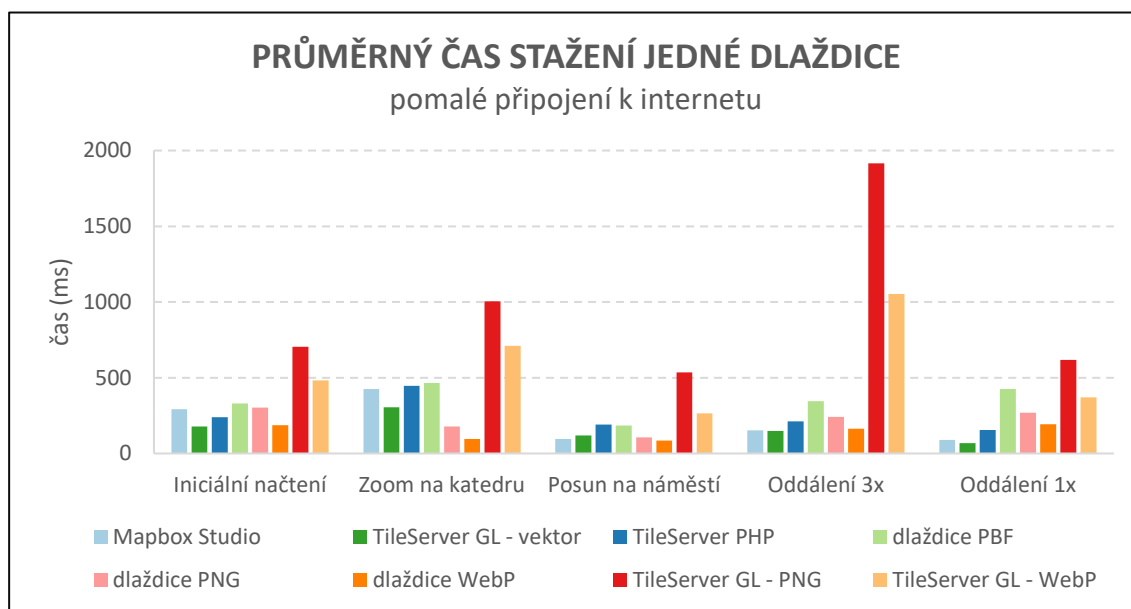
Obr. 23 Čas kompletního načtení mapy (rychlé připojení k internetu).

U ostatních měřených metrik jsou rozdíly patrnější. U všech čtyř uživatelských interakcí s mapou se dá konstatovat, že nejhorší výsledky mají rastrové dlaždice generované na požadavek. U oddálení mapy o tři úrovně docházelo pravidelně k situaci, kdy ještě cca tři vteřiny po spuštění interakce nebyla v levé polovině monitoru načtena jediná z požadovaných dlaždic. Předgenerované rastrové dlaždice ve formátech PNG a WebP vykazují na první pohled rozdílné výsledky. Důvod rozdílu v čase načtení mezi

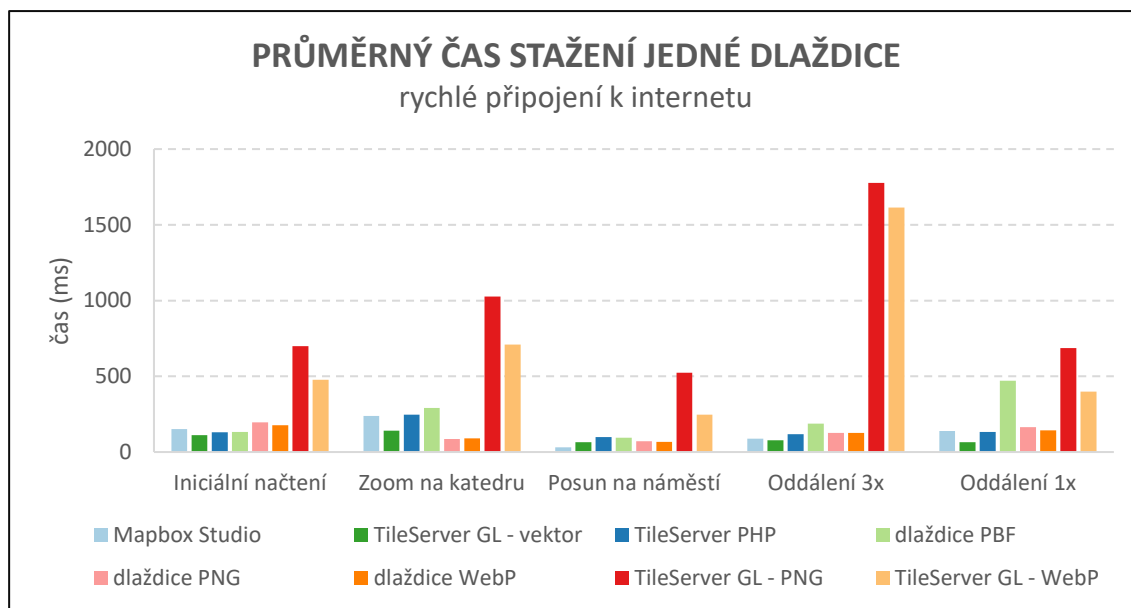
rastrovými a vektorovými dlaždicemi u zoomu na katedru je, že u vektorových dlaždic se jako poslední načítají fonty, ze kterých je tvořen popis. Knihovna Mapbox GL používá pro vektorové dlaždice velmi složitý algoritmus, který při každé interakci s mapou vypočítá, které popisy umístit do mapy a které nikoliv. Výsledkem je mapa s úhlednými a nepřekrývajícími se popisy. Opačnou stranou mince je ale fakt, že poslední sada fontů se při zoomu na katedru načítá se zpožděním až 2500 ms po poslední dlaždici. Geometrie na dlaždicích se pravidelně načítala za méně než čtyři sekundy a jen díky dlouhému načítání popisu (čísel popisných domů) je celková doba požadavku v průměru o téměř vteřinu a půl delší než u předgenerovaných rastrových dlaždic. Uživatel ale vidí mapu, byť bez čísel popisných domů, dříve než v případě rastru. Důležitost načítání fontů se projevuje u následujícího úkonu, posunu na náměstí. U něj se již nemění úroveň přiblížení, fonty jsou načteny z předchozího požadavku, a vektorové dlaždice se díky tomu načítají 2–3× rychleji než jejich rastrové ekvivalenty. Poté při oddálení o tři, resp. jednu úroveň, se opět načítají fonty pro dané úrovně přiblížení, což způsobuje delší čas načtení celé mapy u vektorových dlaždic. Výsledky jsou ale i přes načítání fontů stále srovnatelné nebo i lepší než s předgenerovanými rastrovými dlaždicemi.

7.3.2 Srovnání času stažení jedné dlaždice

Protože srovnání na základě času načtení mapy bylo zatíženo definicí doby trvání u většiny z interakcí, bylo provedeno také srovnání průměrného času, za který se stáhne jediná dlaždice. U této metriky byl řešen problém, že vektorové dlaždice se skládají ze dvou částí, geometrie a fontů, které se načítají současně. Při vizuální analýze naměřených hodnot bylo zjištěno, že časy stažení fontů se příliš neodlišují od časů stažení geometrie. Font, ze kterého je tvořen popis, je navíc nedílnou součástí dlaždice a bez něj by data nebyla úplná. Bylo proto rozhodnuto, že ve výpočtu průměrné doby stažení jedné vektorové dlaždice budou zahrnuty i časy stažení fontu. Čas byl počítán pouze z požadavků, kdy bylo stažení dat úspěšně dokončeno.



Obr. 24 Průměrný čas stažení jedné dlaždice (pomalé připojení k internetu).

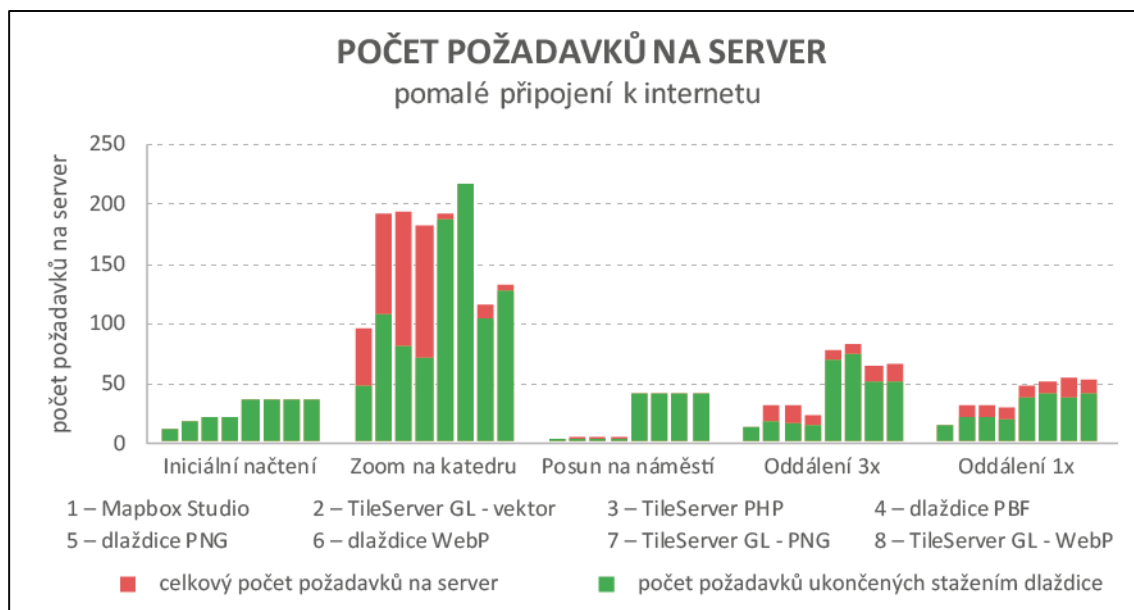


Obr. 25 Průměrný čas stažení jedné dlaždice (rychlé připojení k internetu).

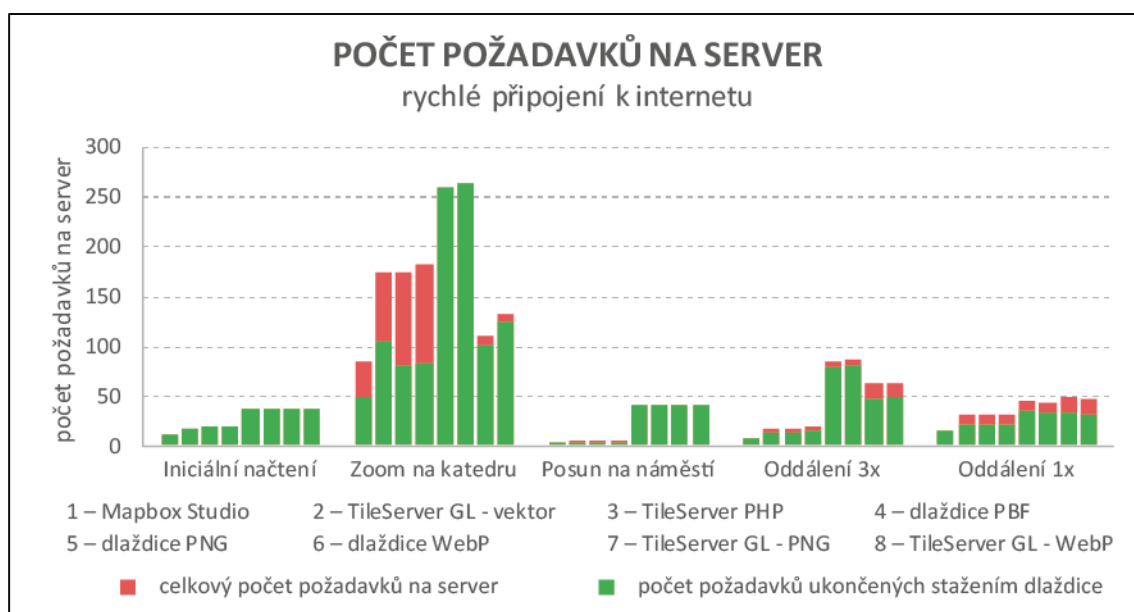
Z výsledků, které jsou vizualizovány na obrázcích 24 a 25, je patrné, že u vektorových dlaždic se nejrychleji načítají dlaždice v aplikaci využívající TileServer GL, který běží na cloudu Amazon. Naopak překvapivě nejpomaleji z vektorových dlaždic se stahují dlaždice uložené ve složkové struktuře ve formátu PBF na webovém hostingu Wedos. Průměrná doba stažení připravených rastrových dlaždic je srovnatelná, nebo i nižší než u vektorových. U zoomu na katedru je rozdíl ve prospěch rastrových dlaždic dán především velkým množstvím stažených dlaždic o malé velikosti v úrovních přiblížení 15–18, které se stahují velmi rychle. Detailněji se stahování dlaždic na těchto úrovních věnují následující kapitoly. Rastrové dlaždice generované na požadavek z vektorových jsou v této metrice výrazně nejhorší. U většiny z interakcí trvá průměrně stažení jedné dlaždice 3–4× déle než u ostatních aplikací, při oddálení o tři úrovně je rozdíl až desetinásobný. Některé z dlaždic se při oddálení o tři úrovně vykreslovaly za více než čtyři vteřiny, což je pro jedinou dlaždici velmi vysoká hodnota. Ve všech případech u dlaždic na požadavek vykazovaly dlaždice ve formátu WebP lepší výsledky než v případě formátu PNG. U některých interakcí byl rozdíl ve prospěch formátu WebP až dvojnásobný.

7.3.3 Srovnání počtu požadavků na server

Rozdíly ve způsobu stahování dlaždic je kromě času načtení jednotlivých dlaždic možné vyjádřit také v počtu požadavků na server při každé z interakcí. Počet požadavků odpovídá počtu pokusů o stažení dlaždic, pouze u iniciálního načtení je do počtu požadavků zahrnut také požadavek na stažení knihovny Mapbox GL, stylu knihovny a ikony webu. Knihovna je kromě aplikace vytvořené pomocí Mapbox Studio vždy dostupná lokálně a je načítaná ze stejného úložiště, jako webová stránka s mapou. V grafech na obrázcích 26 a 27 je červenou barvou znázorněn počet všech požadavků, a zelenou počet úspěšně dokončených požadavků, tedy počet dlaždic (a souborů s fonty), stažených při každé z interakcí. Je-li sloupec zcela zelený, znamená to, že všechny provedené požadavky byly ukončeny stažením dat. K tomu docházelo vždy u iniciálního načtení, kdy byly staženy pouze dlaždice, které se zobrazují při načtení webové stránky v mapovém okně. Pořadí sloupců u každé z interakcí odpovídá číslům v dolní části grafu. Aplikace jsou seřazeny stejně jako ve všech ostatních grafech.



Obr. 26 Počet požadavků na server (pomalé připojení k internetu).



Obr. 27 Počet požadavků na server (rychlé připojení k internetu).

Hodnoty při iniciálním načtení a při posunu na náměstí jsou na rychlosti internetu nezávislé, vždy se načítá stejný počet dlaždic. U zbylých interakcí se již hodnoty liší, ve většině případů bylo na pomalejším připojení odesláno méně požadavků než na rychlém. Důvodem pro tento fakt může být, že na pomalejším připojení se oproti rychlému stihne při zoomu přes mnoho úrovní odeslat pouze zlomek požadavků na dlaždice z dané úrovně předtím, než se uživatel přiblíží na další úroveň v pořadí. Další zajímavostí je vysoký počet neúspěšných požadavků u aplikací s vektorovými dlaždicemi při interakci zoom na katedru. Ten je způsoben užíváním dvou souborů s daty. Aplikace při načítání mapy zobrazuje dlaždice jak ze souboru s dlaždicemi z projektu OpenMapTiles, tak ze souboru, kde jsou uloženy dlaždice s vrstvami letišť a ORP. Při tvorbě dlaždicové vrstvy pomocí

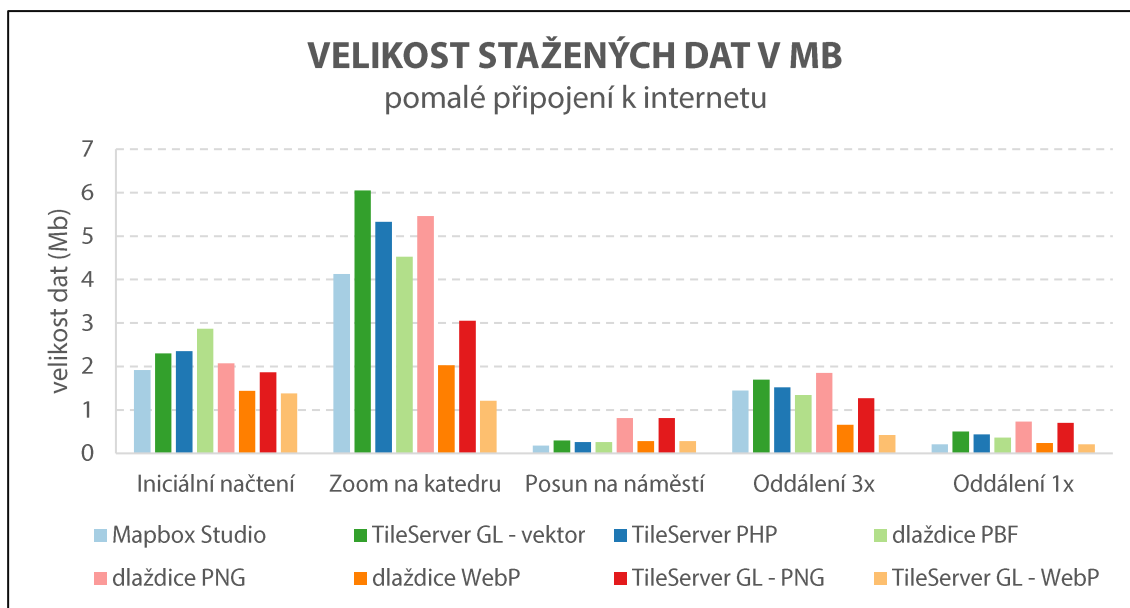
nástroje tippecanoe jsou však vytvořeny a zapsány pouze ty dlaždice, na kterých se vyskytují data. Ostatní dlaždice nejsou k dispozici. Odpověď serveru na požadavek na tyto dlaždice je 204 – No Content, což je oznámení o úspěšném požadavku, který pouze nevrátil data. Fakt, že u aplikací je vysoký počet požadavků, které nebyly ukončeny stažením dlaždice, tedy není způsoben chybou. Aplikace vytvořená v Mapbox Studio používá pouze jediný soubor TileJSON, kterým se odkazuje na použitá data, a proto vysílá vždy zhruba o polovinu méně požadavků než ostatní aplikace s vektorovými dlaždicemi. U ostatních aplikací jsou použity dva soubory ve formátu MBTiles. Díky tomu je počet požadavků u všech aplikací s vektorovými dlaždicemi oproti aplikaci na Mapbox Studio dvojnásobný. Nástroj tippecanoe má implementován příkaz tilejoin, který umožňuje spojit dva soubory MBTiles do jediného, ten však nebyl využit. Po jeho použití by počet požadavků u všech aplikací s vektorovými dlaždicemi klesnul na úroveň shodnou s aplikací vytvořenou v Mapbox Studio.

Počet požadavků je metrika, která dobře odhaluje rozdílnost načítání dat na úrovních zoom 15 a výše u vektorových, resp. rastrových dlaždic. Tento jev byl již částečně popsán v kapitole 4.2.1 a je ukázán na obrázku 10. Aplikace s vektorovými dlaždicemi načítají nejdetailnější geometrii na úrovni 14 a poté již zobrazují stejná data, která mohou být jinak stylována. U rastru musí být na každé úrovni dostupná příslušná dlaždice. Pokud není, dochází k rozostření obrazu. Tento jev lze nejlépe vidět na interakcích posun na náměstí a oddálení o tři úrovně, kde je mapa přiblížena na úrovně 14–17. Při posunu na náměstí stáhne aplikace vytvořená v Mapbox Studio pouze jednu novou dlaždici, ostatní vektorové aplikace stahují dvě (za každou datovou sadu jednu). Aplikace s rastrovými dlaždicemi musí při stejném požadavku stáhnout 40 dlaždic. U oddálení ze zoomu 17 na zoom 14 stahuje Mapbox šest dlaždic, kdežto aplikace s předgenerovanými rastrovými dlaždicemi vyslaly v závislosti na rychlosti připojení 76–85 požadavků a stáhly 68–80 dlaždic. Zátěž na server je tedy u aplikací s rastrovými dlaždicemi mnohokrát vyšší než při použití vektorových dlaždic. Množství rastrových dlaždic stažených na úrovni zoomu 15 a výše je také důvodem nízké průměrné rychlosti stažení jedné dlaždice. Ve vysokých úrovních zoomu mají totiž rastrové dlaždice velmi malý datový objem, stahují se rychle a díky tomu vypočtenou průměrnou rychlost snižují.

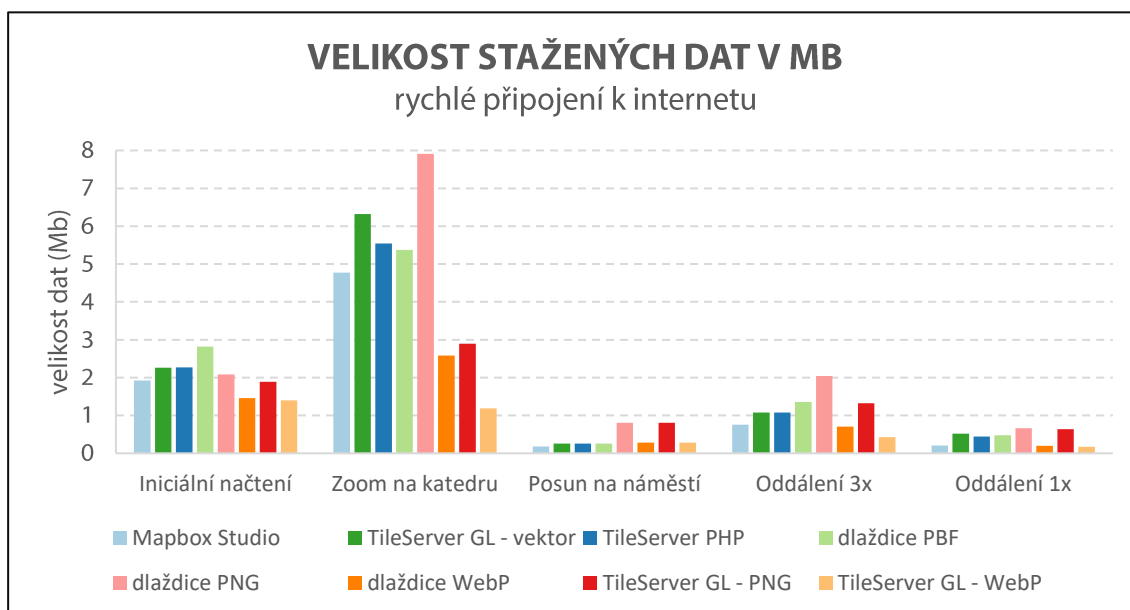
Posledním faktem, který se z popisované metriky dá vyčíst, je o mnoho nižší počet požadavků na rastrové dlaždice generované on-the-fly oproti předgenerovaným ekvivalentům u některých z interakcí. Vysvětlení může být podobné jako pro rozdíl v počtu požadavků na pomalém a rychlém připojení, tedy že došlo ke změně aktuální úrovně zoom dříve, než byla načtena vektorová dlaždice, ze které je následně na serveru tvořena rastrová. Tento předpoklad však nelze nijak ověřit.

7.3.4 Srovnání velikosti stažených dat

Poslední z měřených metrik byla velikost stažených dat při každé z interakcí. Naměřené hodnoty odpovídají součtu velikosti všech dlaždic, které byly při interakci úspěšně staženy. Do prezentované hodnoty se tedy nepromítají data, jejichž stahování nebylo dokončeno. V případě vektorových dlaždic se na celkové velikosti z části podílí i fonty, které tvoří popis na dlaždicích. Především u iniciálního načtení tvořila velikost fontů i více než polovinu stažených dat. Velikost webové stránky, knihovny Mapbox GL a jejího stylu a také velikost souborů JSON a TileJSON obsahující definici stylu a používaných dat nebyla u iniciálního načtení do výsledné hodnoty započítána. Naměřené hodnoty jsou prezentovány na obrázcích 28 a 29.



Obr. 28 Velikost stažených dat v Mb (pomalé připojení k internetu).



Obr. 29 Velikost stažených dat v Mb (rychlé připojení k internetu).

Z výsledků lze vidět, že u aplikací s vektorovými dlaždicemi je množství stažených dat u všech požadavků srovnatelné. Dá se konstatovat, že koresponduje s počtem úspěšných požadavků na server. Velké rozdíly jsou u aplikací s rastrovými dlaždicemi. Aplikace s dlaždicemi ve formátu WebP stáhla s výjimkou iniciálního načtení vždy zhruba třikrát méně dat než stejná aplikace s dlaždicemi ve formátu PNG. Aplikace s předgenerovanými dlaždicemi pořizovala při všech interakcích více dat, než aplikace s dlaždicemi generovanými on-the-fly. Také při generování dlaždic na požadavek byla velikost stažených dat ve formátu PNG zhruba trojnásobná oproti formátu WebP.

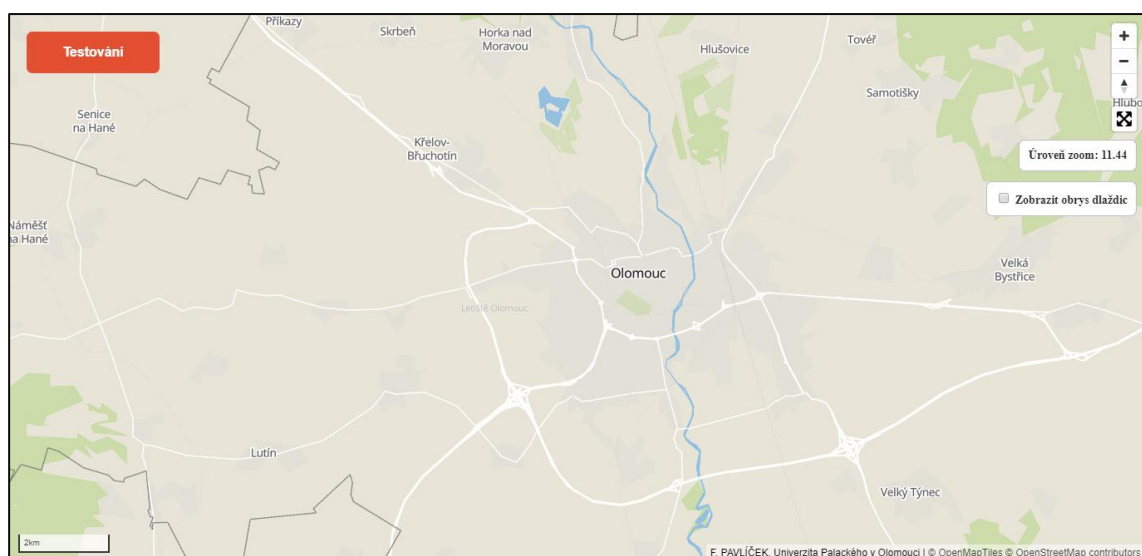
U rastrových dlaždic se rychlost internetu na množství stažených dat projevuje podobně, jako na počet požadavků – čím rychlejší internet, tím více dlaždic se stihne

stáhnout a tím vyšší je také objem stažených dat. U vektorových dlaždic je na rychlém připojení také stahováno více dat než na pomalém, a to i přesto, že počet požadavků byl na rychlém internetu zpravidla nižší. Počet úspěšně dokončených požadavků však byl srovnatelný nebo i vyšší než na pomalém připojení.

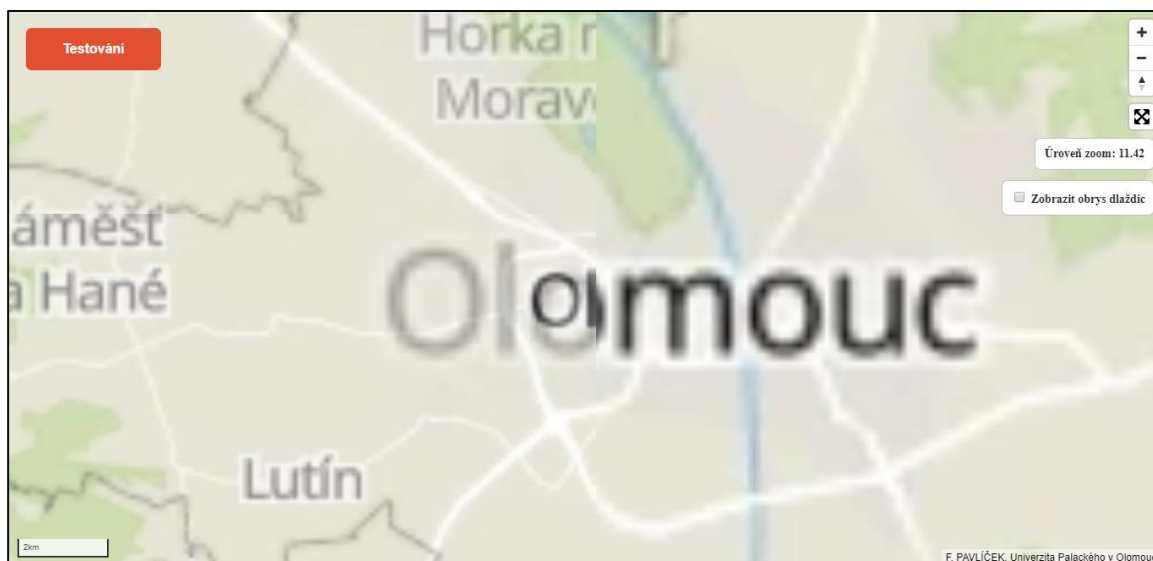
7.3.5 Srovnání neměřených aspektů

Předchozí kapitoly popisovaly rozdíly mezi aplikacemi dle hodnot naměřených při testování. Existují však aspekty, ve kterých se aplikace liší, ale nelze je nijak změřit. Řadí se mezi ně např. uživatelský či technický aspekt. Především uživatelský aspekt bývá pro návštěvníky webových stránek často klíčový a při rozhodnutí o použití konkrétní webové mapy může pocit z procházení mapové aplikace rozhodnout o jejím užití i přes částečně zhoršený výkon oproti konkurenční aplikaci. Zde popisované aspekty jsou rozdílné mezi vektorovými a rastrovými dlaždicemi a formát používané dlaždice nemá na prezentované jevy vliv. K popisovaným jevům dochází u všech formátů vektorových i rastrových dlaždic.

Načítání vektorových a rastrových dlaždic probíhá rozdílně. Zatím co vektorové dlaždice při interakci s mapou načítají novou geometrii, případně sadu fontů pro popis, rastrové dlaždice načítají nový obrázek. Výsledkem je zcela jiný pocit z procházení mapy, který je demonstrován na obrázcích 30 a 31, pořízených při procházení aplikace nad TileServer PHP, resp. s předgenerovanými dlaždicemi ve formátu WebP. Obrázky byly získány při rychlém přiblížení na Olomouc a jsou výsledkem lidské interakce, nikoliv strojové jako v případě testování výkonnosti aplikací. Byly pořízeny na téměř identické úrovni zoomu. U vektorových dlaždic je před načtením geometrie z příslušné úrovně přiblížení stále vidět generalizovaná geometrie, použitá při předchozím zobrazení mapy. Zároveň v mapě často před úplným načtením chybí popisy. Důvod chybějícího popisu byl popsán již v kapitole 7.3.1. Při načítání rastrových dlaždic lze pozorovat jev, kdy dříve načtené obrázky zůstávají na monitoru uživatele a při přiblížování jsou pomalu nahrazovány novými. Dochází však k tomu, že uživatel chvíli vidí rozostřený obrázek s překrývajícími se popisy na dlaždicích zobrazených dříve. Při pomalejším přiblížování se mapa s vektorovými dlaždicemi zobrazuje téměř plynule, u mapy s rastrovými dlaždicemi dochází k viditelnému překreslování dlaždic při přechodu z jedné úrovně zoom do následující.

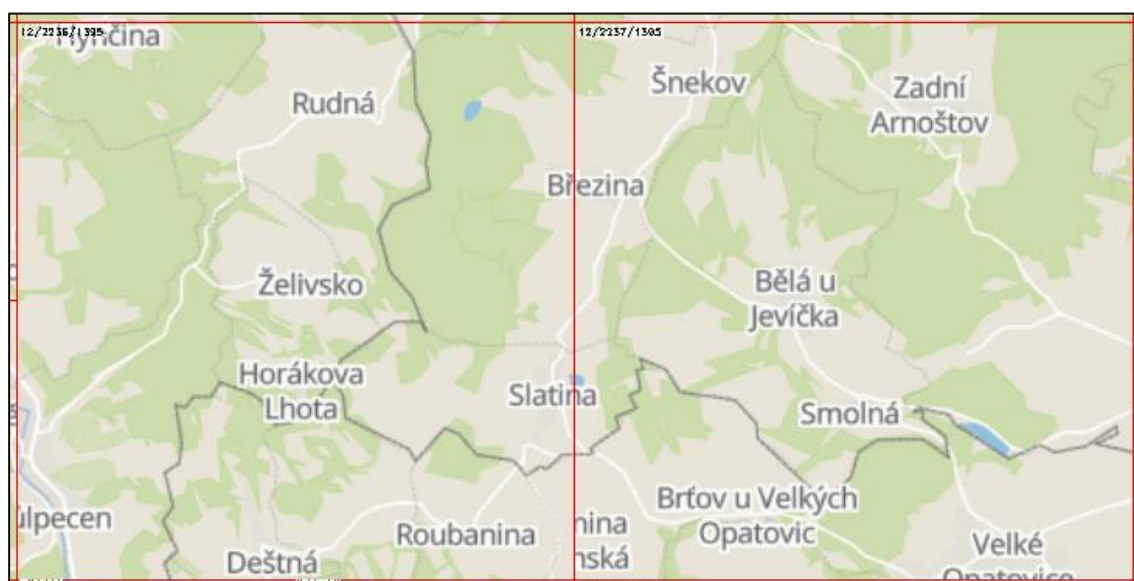


Obr. 30 Vizuální vzhled mapy s vektorovými dlaždicemi při rychlém přiblížení.



Obr. 31 Vizuální vzhled mapy s rastrovými dlaždicemi při rychlém přiblížení.

Druhým z aspektů, kterých si uživatel při prohlížení mapy může všimnout, je nezobrazená část textu u těch popisů, které leží na hraně dlaždice. K tomuto jevu dochází pouze u rastrových dlaždic a je problémem spojeným s použitými dlaždicemi z projektu OpenMapTiles. Záležitost byla řešena na internetových fórech, kde se uvádí, že problém se vyskytuje především ve verzích 2.x. Také v používané verzi 3.6.1 byl ale tento problém poměrně častým. Zajímavostí je, že dochází k situacím, kdy jsou na stejné hraně dlaždice některé popisy v pořádku a jiné viditelné jen z části. Jedna z nich je zobrazena na obrázku 32, kde je v dolní části rozdělen popis jedné z obcí. Problémů s nekompletním popisem se při použití rastrových dlaždic z projektu OpenMapTiles bohužel vyskytuje poměrně mnoho. Vektorové dlaždice tento problém neřeší, protože popis se vykresluje jako samostatný objekt až nad mapovými daty. Nástroj, který se o umístování popisu v knihovně Mapbox GL stará, navíc při každé změně mapy vypočítá, které popisy zobrazit, aby nedocházelo k přílišnému zaplnění mapy.



Obr. 32 Příklad nekompletního popisu u rastrových dlaždic.

8 VÝSLEDKY

Hlavním cílem této diplomové práce bylo provést srovnání rastrových a vektorových dlaždic ve webových mapách. Tohoto cíle bylo dosaženo pomocí dílčích cílů práce, kterými bylo popsat teoretická východiska při generování dlaždic se zaměřením především na rozdíly mezi oběma metodami a následně provést testování obou zmíněných přístupů při využití v mapových aplikacích.

Teoretická část

V teoretické části se práce nejprve zabývá obecnými rozdíly mezi rastrovými a vektorovými daty. Následně popisuje možné způsoby přenosu prostorových dat po internetu a věnuje se také formátům prostorových dat, které bývají pro přenos po internetu nejčastěji využívány. Stěžejní je v teoretické části kapitola 4, která shrnuje současné poznatky jak pro rastrové, tak i vektorové dlaždice. Text se věnuje nejčastěji používaným schémátům pro oba přístupy a na praktických ukázkách demonstruje způsob, jakým se rastrové a vektorové dlaždice odlišují. Popsány jsou rozdíly v orientaci os u schémat TMS a XYZ a jsou vysvětleny také rozdíly ve způsobu číslování dlaždic. Dále se text zabývá způsoby definování symbologie a možnými postupy při její následné změně. U vektorových dlaždic byla krátce popsána generalizace jako jeden z nejdůležitějších procesů při jejich generování. Jedna z kapitol se věnuje také rekonstrukci geometrií při zobrazení dat ve formě vektorových dlaždic, tímto procesem se ale práce hlouběji nezabývala, protože dlaždice analyzuje z pohledu podkladových dat ve webových mapách.

Tvorba mapových aplikací

Aby bylo možné prakticky otestovat webové mapy s rastrovými a vektorovými dlaždicemi, byly provedeny případové studie věnující se tvorbě takových aplikací. Cílem této části bylo vytvořit ze stejných dat aplikace s vektorovými i rastrovými dlaždicemi a na jejich tvorbě popsat rozdíly v přístupech i použitých technologiích. Celkem bylo vytvořeno osm aplikací, které vypadají na frontendu stejně či velmi podobně, rozdíl mezi nimi ale je v technologii, kterou používají k poskytování mapy. Pro tvorbu aplikací bylo využito pět různých přístupů a tři druhy úložišť. Kapitoly, které se této části práce věnují, jsou rozčleněny na části Příprava a nahrání dat, Stylování dat a Sdílení mapy. Kapitola o přípravě dat pojednává o infrastruktuře potřebné pro vytvoření dat a způsobu, jakým byla data přenesena na úložiště, odkud jsou poskytována. V části o stylování mapy je popsána tvorba a úprava stylu každé z map a následně definice stylu při inicializaci mapy, které se text u každé případové studie věnuje v poslední fázi. U všech pěti použitých přístupů je tak popsán kompletní postup pro tvorbu mapy včetně způsobu změny stylu a tato část textu může být přímo využita studenty a vyučujícími při tvorbě podobných webových map.

Výsledky testování nahrávání dat na úložiště

Testování nahrávání dat na úložiště mělo dva cíle. Prvním z nich bylo demonstrovat rozdílný způsob zacházení s daty ve formátu MBTiles a s dlaždicemi ve složkové struktuře. Uložení dlaždic ve složkách bylo používáno již od roku 2005 a pro některé nástroje je stále primární cestou, jak exportovat data ve formě mapových dlaždic. Od roku 2011 je ale vyvíjen formát MBTiles, který složkovou strukturu zvládá poměrně úspěšně nahradit. Druhým z cílů bylo poskytnout alespoň orientační časový údaj o tom, jak dlouho se data na testovaná úložiště nahrávají. Testováno bylo pouze na datech v rozsahu pro Českou republiku, u rastrových dlaždic navíc ještě pouze po úroveň zoomu 14. Informace z testování mohou být využity pro odhad doby trvání nahrávání dlaždic z jiného území, popř. z celého světa. Pro testování byly vybrány dvě lokality s rozdílnou rychlostí

připojení k internetu. První z nich disponovala připojením o rychlosti 3–20 Mbit/s, na druhé se rychlost internetu pohybovala v rozmezí 50–200 Mbit/s. Dle výzkumu společnosti Ookla, která se věnovala průměrným rychlostem internetu v České republice, se tato místa dala považovat za lokality s podprůměrnou, resp. nadprůměrnou rychlostí internetu. V práci bylo použito označení pomalé, resp. rychlé připojení.

Výsledky testování ukázaly, že nahrávání dlaždic ve složkové struktuře je mnohonásobně pomalejší než ve formátu MBTiles. Zároveň bylo zjištěno, že vliv velikosti dat na rychlost nahrávání je patrný především na pomalém připojení k internetu, kde byly dlaždice ve formátu WebP, optimalizovaném pro přenos dat na webu, nahrány cca o hodinu rychleji, a to jak v případě webového hostingu, tak v případě cloudu. U rychlého připojení je rozdíl v rychlosti nahrávání dlaždic ve složkové struktuře u webového hostingu i cloudu nepatrný. To je pravděpodobně způsobeno dosažením limitu diskových úložišť pro přenos a zápis nových souborů zároveň, který dle zjištění z testování činí zhruba 19 souborů/s v případě SSD disku na cloudu, resp. 15 souborů/s v případě serverového disku SAS na webovém hostingu. U souboru ve formátu MBTiles má vliv na dobu přenosu především rychlost připojení k internetu a při nahrávání na rychlém připojení bylo dosahováno i rychlostí kolem 25 Mb/s.

Výsledky testování výkonu aplikací

Nad vytvořenými webovými aplikacemi bylo provedeno výkonnostní testování, které mělo za cíl změřit rozdíly v rychlosti a způsobu načítání mezi rastrovými a vektorovými dlaždicemi a také mezi použitými formáty a technologiemi pro poskytování mapy. Pro tento účel bylo navrženo poloautomatické testování, které simulovalo uživatelské zacházení s mapou. Kromě iniciálního načtení se skládalo ze čtyř dalších interakcí – zoomu na zájmový objekt, kterým byla při testování budova Katedry geoinformatiky, posunu mapy, oddálení o tři úrovně zoomu a oddálení o jednu úroveň zoomu. Testování probíhalo pomocí konzole v prohlížeči Google Chrome, která umožňuje zaznamenat při interakci s mapou všechny požadavky na server a následně jejich seznam vyexportovat ve formátu HAR. Pro každou aplikaci bylo provedeno deset měření na pomalém i rychlém připojení ve dvou časových horizontech. Pět měření bylo vždy provedeno v ranních hodinách (7:30–8:30) a pět v odpoledních hodinách (18:00–19:00). U všech interakcí bylo měřeno pět údajů – celková doba načtení mapy, počet požadavků na server, počet úspěšně dokončených požadavků na server, průměrná doba stažení jedné dlaždice a velikost stažených dat.

Prvním krokem při testování bylo ověření, zda se statisticky liší vzorky posbírané v ranních a večerních hodinách. Pro tento dílčí cíl bylo provedeno dalších 30 měření v obou testovacích časech nad aplikací vytvořenou v Mapbox Studio v lokalitě s pomalým připojením k internetu. Z měření byl zjištěn čas načtení mapy pro všech pět interakcí a následně byl pro všechny interakce proveden F-test analýzy rozptylů, pomocí kterého byly srovnány výsledky z ranního a večerního měření. Byla stanovena hypotéza H_0 , podle které jsou rozptyly obou statistických souborů shodné. U třech z pěti interakcí bylo zjištěno, že zkoumané soubory se statisticky neliší. U ostatních dvou interakcí (zoom na katedru a posun na náměstí) byl zjištěn statistický rozdíl. Po vizuální analýze bylo odhaleno, že tento rozdíl způsobilo především vyšší množství extrémních hodnot u jednoho z časových horizontů. Na základě výsledků testu bylo rozhodnuto, že jako prezentovaná střední hodnota u naměřených dat bude zvolen medián, aby bylo zamezeno vlivu extrémních hodnot na prezentované výsledky. Zároveň bylo stanoveno, že měření z ranních a večerních hodin nebudou v práci dále odlišována a pro účely vyhodnocení dat budou považována za nezávislá.

Výsledky testování byly rozděleny dle jednotlivých zkoumaných metrik. První zkoumanou metrikou byl čas načtení mapy při každé z interakcí. Jak již bylo zmíněno v textu, tato metrika může být částečně ovlivněna nastavenou dobou trvání, která byla stanovena z důvodu dosažení podobnosti rychlosti strojového provedení interakcí s uživatelským. Nejlepší výsledky z této metriky vykazovaly s výjimkou interakce posun na náměstí aplikace s předgenerovanými rastrovými dlaždicemi. Výrazně naopak zaostávaly aplikace s rastrovými dlaždicemi generovanými na požadavek z vektorové mapy, v případě oddálení o tři úrovně byly aplikace s těmito dlaždicemi pomalejší až pětinasobně. U aplikací s vektorovými dlaždicemi byl zjištěn velký vliv načítání fontů pro popis, které prodloužily výslednou rychlost načtení mapy až o 2500 ms. Při rychlejším načítání fontu by pravděpodobně aplikace s vektorovými dlaždicemi předčily v rychlosti i předgenerované rastrové dlaždice.

Z důvodu výše popsaného vlivu nastavené rychlosti interakcí na hodnoty u první prezentované metriky byla měřena také průměrná rychlost stažení jedné dlaždice. U vektorových dlaždic do měření vstupovala také rychlost načtení fontů, které na dlaždicích tvoří popis. S výjimkou zoomu na katedru, kdy se vektorové dlaždice stahovaly cca 2× déle než předgenerované rastrové, byly u ostatních interakcí průměrné rychlosti stahování dlaždic mezi těmito dvěma kategoriemi srovnatelné. Rastrové dlaždice generované na požadavek opět vykazovaly znatelně horší výsledky, především ve formátu PNG. Formát WebP byl sice rychlejší (především na pomalém připojení až dvojnásobně), ve srovnání s dalšími aplikacemi ale stále zaostával. U oddálení o tři úrovně byl oproti ostatním aplikacím průměrný čas stažení jedné dlaždice až 10× vyšší v neprospěch rastrových dlaždic generovaných na požadavek.

Třetí zkoumanou metrikou byl počet požadavků na server. Ten byl prezentován společně s počtem požadavků, které skončily stažením dlaždice. Z výsledků této metriky je patrné, že aplikace s vektorovými dlaždicemi stáhly u většiny interakcí méně dlaždic než v případě aplikací s rastrovými dlaždicemi. Nejmarkantnější byl rozdíl u interakce posun na náměstí, kde byly staženy 1–2 dlaždice v případě vektoru a 40 dlaždic v případě rastru. Z důvodu dlouhého trvání rasterizace na straně serveru, která je prováděna u rastrových dlaždic generovaných na požadavek, byl většinou počet požadavků u těchto aplikací nižší než v případě předgenerovaných dlaždic. Z výsledků popsaných výše ale vyplývá, že vliv tohoto faktu na výslednou rychlost aplikace je zanedbatelný. Vysoký počet požadavků u některých aplikací s vektorovými dlaždicemi, které neskončily stažením dlaždice, byl způsoben rozsahem dat v druhém souboru s dlaždicemi. Hranice ORP a letiště se na většině dlaždic nevyskytují, na pokus o jejich stažení proto server odpovídal hláškou o úspěšném požadavku bez nutnosti stahování dat.

Poslední měřenou metrikou byla velikost stažených dat při každé z interakcí. Nejvíce dat ve většině případů potřebovala aplikace s předgenerovanými dlaždicemi ve formátu PNG. Aplikace s dlaždicemi WebP stahovala cca 3× méně dat než v případě dlaždic PNG. Při zoomu na katedru stahovaly aplikace s vektorovými dlaždicemi většinou 4–6 MB dat, rastrové dlaždice s výjimkou předgenerovaných PNG potřebovaly při této interakci pouze 1–3 MB. U ostatních interakcí jsou již naměřené objemy srovnatelné. Nejlépe z tohoto srovnání téměř u všech interakcí vycházejí dlaždice ve formátu WebP, ať už předgenerované, nebo generované na požadavek.

V poslední části testování byly popsány neměřené aspekty procházení testovaných aplikací, mezi které se řadí uživatelský či technický aspekt. Na příkladech pořízených při procházení map je demonstrován rozdílný způsob načítání i problémy s popisem u rastrových dlaždic. Tyto aspekty hrají při používání mapy spíše estetickou roli, mohou však být důležitým faktorem při výběru používané mapové aplikace.

9 DISKUZE

Tato práce si kladla za cíl vytvořit aplikace s rastrovými a vektorovými dlaždicemi a navzájem je porovnat. Původním záměrem bylo použít k tvorbě aplikací knihovnu Leaflet, která je stále nejpopulárnější knihovnou pro tvorbu webových map. V průběhu práce se však ukázalo, že možnosti práce s vektorovými dlaždicemi v knihovně Leaflet jsou do jisté míry omezené. Vektorové dlaždice v knihovně totiž nejsou nativně podporovány a jediným způsobem, jakým je lze použít, je pomocí pluginu. Ten funguje pouze v určitých verzích knihovny, a navíc jen přenáší mapu vytvořenou v knihovně Mapbox GL a umožňuje její použití v knihovně Leaflet tak, aby nad mapou mohly být použity i ostatní pluginy vytvořené původně pro Leaflet. Protože ale aplikace tvořené při diplomové práci vznikaly zcela nově, bylo rozhodnuto o využití knihovny, která vektorové dlaždice podporuje nativně. Takovými knihovnami byly v době tvorby práce pouze Mapbox GL a OpenLayers 3. Protože jedna z aplikací vytvořených v rámci práce byla postavena nad nástrojem Mapbox Studio, který umožňuje sdílení vytvořené mapy pouze pomocí knihovny Mapbox GL, byla z důvodu plánovaného srovnání tato knihovna použita také v ostatních aplikacích. Knihovna sice zvládá zobrazení rastrových dlaždic, primárně je ale určena pro ty vektorové. Je tedy otázkou, jestli by aplikace s rastrovými dlaždicemi nedosahovaly lepší výkonnosti v knihovně, která je určena primárně pro práci s nimi. Není také pochyb o tom, že podpora vektorových dlaždic bude v budoucnu narůstat, a dá se očekávat, že i ostatní mapové knihovny, původně vytvořené pro práci s rastrovými dlaždicemi, podporu vektorových dlaždic implementují. Testování výkonnosti aplikací například ve zmíněné knihovně Leaflet může být předmětem dalšího zkoumání.

V souvislosti s knihovnou Mapbox GL je na tomto místě vhodné zmínit, že společnost Mapbox se v posledních letech velmi zasloužila o rozvoj vektorových dlaždic a jejich širší rozšíření v mapových aplikacích. Kromě knihovny Mapbox GL vytvořila také specifikaci formátu MBTiles, nástroj tippecanoe pro vytvoření dlaždic z prostorových dat v různých formátech, či nástroj Mapbox Studio pro jednoduchou tvorbu map s použitím technologie vektorových dlaždic. Další společností, která se přičinila o rozšíření dlaždic ve vektorovém formátu, je firma MapTiler (dříve Klokan Technologies). Kromě již dlouho dostupného serveru TileServer PHP, který má ve verzi 2 implementovanou funkcionalitu pro konzumaci vektorových dlaždic, vytvořila tato společnost také TileServer GL, open source mapový server, který konzumuje dlaždice ve formátu MBTiles a může být spuštěn pomocí moderních technologií Docker či Node.js. Společnost MapTiler navíc své snažení významně podpořila projektem OpenMapTiles, který nabízí data ve formě vektorových dlaždic pro celý svět i menší administrativní celky pro open source a nekomerční projekty zdarma, byť data poskytovaná bez úplaty nejsou nejnovější dostupnou verzí. Díky tomu, že obě zmíněné firmy své produkty vytvořily jako open source, dostává se jim širokého využití a dá se předpokládat, že tento trend bude pokračovat i v budoucnu. To, že všechny zmíněné technologie jsou open source, bylo jedním z hlavních důvodů jejich využití také v této diplomové práci.

Využívání open source technologií mělo svá úskalí. Tím hlavním bylo, že většina návodů a rad související s jejich použitím předpokládá práci na open source operačním systému, kterým je nejčastěji Linux. Počítač využívaný při tvorbě této práce měl však nainstalován operační systém Windows 10 Home. Při mnoha krocích tak muselo být oproti využitým návodům sáhnuto k alternativnímu řešení. Namátkou se jednalo například o nutnost instalace Docker Toolbox namísto samotného enginu Docker, nástroje PuTTY pro spojení s počítačem na cloudu Amazon EC2, nebo softwaru Cygwin pro zpřístupnění některých příkazů běžně dostupných v příkazové řádce na strojích

s operačním systémem Linux. I přesto, že všechny problémy byly v průběhu práce vyřešeny i na počítači s operačním systémem Windows, dá se konstatovat, že pro tvorbu aplikací využívajících open source nástroje se operační systém Linux jeví jako vhodnější.

Při zadání diplomové práce byla kromě aplikací plánována také tvorba mapových stylů, které by mohly být v budoucnu využity například studenty katedry geoinformatiky. Přestože tvorba mapových stylů dle specifikace Mapbox GL Styles byla započata, bylo od vytvoření mapových stylů nakonec upuštěno. Důvodem je již existující velké množství různorodých mapových stylů v této specifikaci, které jsou navíc volně dostupné na stránkách Mapbox jako open source. Mapové styly jsou velmi komplikované, například styl Mapbox Streets obsahuje kolem 120 vrstev. Základní styl užívaný aplikací Mapy.cz dokonce sestává z asi 200 vrstev. Tvorba dobře vypadajících mapových stylů je náročná na čas i design a vytvoření původně plánovaných 3–5 stylů v různých specifikacích a designech může být spíše námětem na další absolventskou práci.

I přesto, že bylo vytvořeno osm testovacích aplikací, má tato část práce prostor k rozšíření. U vektorových dlaždic byly použity čtyři různé přístupy ke zpřístupnění dat, všechny ale používají specifikaci vektorových dlaždic Mapbox Vector Tiles. Ta je sice v současnosti nejpoužívanější a vzhledem k jejímu přijetí od společnosti Esri se dá předpokládat, že tomu tak bude i nadále, přesto existují i jiné specifikace, kterými se práce vůbec nezabývala. Namátkou se jedná o formáty GeoJSON, TopoJSON a UTFGrid, ve kterých mohou být vektorové dlaždice také vytvořeny. U rastrových dlaždic byly použity jen dvě metody zpřístupnění dat a práce se spíše soustředí na porovnání tradičního formátu pro dlaždice PNG s novějším WebP. Nebylo však testováno například umístění předgenerovaných dlaždic na cloud, nebo jejich zabalení do formátu MBTiles. V souvislosti s rastrovými dlaždicemi byla opomenuta také webová služba WMTS, nicméně se dá konstatovat, že moderní webové mapové aplikace již využívají spíše mapové knihovny v kombinaci s jazyky HTML a CSS.

Jako zcela zásadní se ukázal rozdíl mezi rastrovými a vektorovými dlaždicemi při generování rastrových dlaždic ve formátu PNG a WebP. V aplikacích, které je využívají, jsou dlaždice uloženy v rozsahu pro Českou republiku pouze do úrovně zoomu 14, při vyšším přiblížení již dlaždice nejsou dostupné a dochází k rozostření poslední dostupné dlaždice. Důvodem byla nedostatečná infrastruktura pro generování rastrových dlaždic na vyšších úrovních. Českou republiku na úrovni 14 pokrývá celkem 55 490 dlaždic. Na každé další úrovni je to ale čtyřnásobně více, na úrovni 15 tedy 221 960 atd. V zomech 15–21 je to celkem 1 212 123 560 dlaždic, které pokrývají pouze Českou republiku. Pro generování takového množství dlaždic je potřebná daleko větší infrastruktura, než je jeden notebook, na kterém byla práce tvořena. Proto bylo rozhodnuto o generování dlaždic pouze do úrovně 14, jako je tomu v případě vektorových dlaždic. Problém nastal při testování, kdy tři z pěti interakcí zobrazovaly také dlaždice na vyšších úrovních zoomu než 14. Pro účely testování byly pro Olomouc a okolí vzdálené zhruba do 10 km generovány i dlaždice na úrovních zoomu 15–18, které se při testování zobrazovaly. Na zbylém území republiky ale tyto dlaždice chybějí.

Velkým otazníkem při zpracování práce bylo měření vzhledem k rychlosti připojení k internetu. Na obou měřených lokalitách rychlost připojení kolísala. Při testování rychlosti nahrávání na úložiště bylo především v lokalitě s pomalejším připojením mnoho měření v průběhu přerušeno, protože rychlost připojení se rapidně snížila, nebo dokonce došlo k úplnému přerušení spojení. Několikrát ale bylo přerušeno i testování na rychlejším připojení. Při testování načítání aplikací bylo v jednom případě testování z důvodu rychlosti připojení neodpovídajícího uvedeným hodnotám v lokalitě s rychlým připojením zcela ukončeno a přeloženo na další den. Navíc byl zjištěn i rozdíl v rychlosti

načítání aplikací mezi různými počítači ve stejné lokalitě. Dá se tedy předpokládat, že vlivů na naměřené hodnoty existuje více, než pouze použitá technologie a rychlost připojení k internetu. Pozitivní efekt na naměřené hodnoty by mohlo mít například přesunutí webových aplikací na server komunikující přes protokol HTTPS, namísto používaného HTTP. V možnostech této práce však nebylo všechny vlivy na naměřené hodnoty spolehlivě analyzovat a eliminovat.

Jedním z vlivů, které mohly rychlost načítání ovlivnit, bylo využití dvou datových souborů ve formátu MBTiles u aplikací s vektorovými dlaždicemi nad TileServer GL a TileServer PHP. Stejný přístup byl uplatněn také u aplikací s extrahovanými dlaždicemi ve formátu PBF, kde se dlaždice nacházely ve dvou složkách. V místech, kde se vyskytovala data z vrstvy ORP či letišť, docházelo ke stahování dvou dlaždic a jejich překrytí. Tento fakt popisuje především kapitola 7.3.3. Jevu lze zamezit využitím příkazu `tilejoin` v nástroji `tippecanoe`, pomocí kterého je možné spojit dva soubory s dlaždicemi ve formátu MBTiles do jediného. Tento proces byl proveden zhruba dva týdny po dokončení testování a záměrem bylo v závěru práce porovnat také naměřené hodnoty ve zmíněných aplikacích s vektorovými dlaždicemi po této úpravě. Bylo však zjištěno, že podmínky pro testování se za uplynulé dva týdny na testovacím stroji změnila a všechny aplikace vykazují jiné výsledky, než tomu bylo v době testování, které bylo následně vyhodnoceno. Z tohoto důvodu nebylo již testování nad novými daty provedeno. Spojení datových souborů má však pozitivní efekt ve snížení celkové velikosti dat na serveru, proto bylo rozhodnuto o jejich použití na webové stránce k diplomové práci s přihlédnutím k omezené kapacitě serveru Katedry geoinformatiky.

V diplomové práci byly splněny všechny dílčí cíle s výjimkou přípravy mapové symbologie. Ta se ukázala jako časově náročnější, než se při zadání předpokládalo. Protože vektorové dlaždice se pravděpodobně budou užívat stále častěji, tvorba mapových stylů může být předmětem dalších absolventských prací a tato diplomová práce může být jejím řešiteli dobrým východiskem.

10 ZÁVĚR

Rychlý rozvoj webových aplikací zasáhl i ty s mapovou tematikou, ve kterých se kromě rastrových dlaždic začínají používat také dlaždice vektorové. Cílem této diplomové práce bylo porovnat oba zmíněné přístupy, definovat jejich shodné a odlišné znaky v teoretické rovině a na základě provedené analýzy vytvořit mapové aplikace, využívající oba druhy dlaždic. Závěrečnou částí práce bylo porovnat aplikace z několika hledisek.

V první části práce byl nejdříve definován rozdíl mezi vektorovými a rastrovými daty. Následně se práce zaměřila na možnosti přenosu dat po síti World Wide Web a popsala dva nejčastěji používané přístupy – webové služby a souborové uložení dat. Stěžejní z teoretické části je kapitola o mapových dlaždicích. U obou zkoumaných metod jsou v této kapitole popsána nejpoužívanější schémata pro zobrazení dlaždic a také způsoby tvorby symbologie, které se u obou metod značně liší. U vektorových dlaždic bylo po jedné kapitole věnováno také generalizaci prostorových dat a rekonstrukci geometrií, která je prováděna po rozdělení původních dat na dlaždice. V závěru teoretické části byly popsány nástroje pro generování obou druhů dlaždic, servery, které je možné použít pro zpřístupnění dlaždic na internetu, klientské knihovny s podporou mapových dlaždic a softwaru, ve kterých lze dlaždice zobrazit.

V praktické části byly nejprve tvořeny mapové aplikace. Celkem bylo vytvořeno osm aplikací, využívajících pět odlišných technologií. Čtyři z aplikací poskytují vektorové dlaždice, zbylé čtyři zobrazují dlaždice rastrové. Aplikace vypadají na frontendu stejně či velmi podobně, liší se ale použitým serverem, úložištěm, či způsobem uložení dlaždic. Využívají celkem čtyři formáty dlaždic, MBTiles, PBF, PNG a WebP a několik relativně nových technologií jako Mapbox Studio či Docker. V textové části je detailně popsán proces generování vstupních dat a úprava stylu aplikací. Kdokoliv tak může dle návodu v této práci vytvořit aplikaci postavenou na stejné technologii, ale se svým vlastním mapovým stylem.

Před testováním výkonnosti aplikací bylo provedeno testování rychlosti nahrávání dat na úložiště. Účelem tohoto testování bylo změřit rozdíly v rychlosti nahrávání na různá úložiště v závislosti na typu, formátu, velikosti a způsobu uložení dat. Měření byla provedena ve dvou lokalitách s odlišnou rychlostí připojení k internetu. Naměřené hodnoty ukazují, že vliv velikosti dat na rychlost nahrávání se projevuje především u pomalejšího připojení k internetu. Zároveň bylo zjištěno, že dlaždice ve složkové struktuře se na pomalém připojení nahrávají zhruba 2–3× pomaleji než ve formátu MBTiles. Na rychlém připojení byl rozdíl v rychlosti nahrání mezi souborem MBTiles a složkovou strukturou mnohonásobně vyšší. Testování také odhalilo, že nahrávání na cloud proběhlo ve většině případů rychleji než na webový hosting, rozdíly se však většinou pohybovaly pouze v jednotkách minut.

V dalším kroku bylo vytvořeno poloautomatické testování za účelem ověření výkonnosti aplikací. Toto testování mělo simulovat uživatelské chování v mapové aplikaci a skládalo se z pěti interakcí. Ve všech osmi aplikacích pak bylo provedeno deset měření na pomalém a deset měření na rychlém připojení k internetu, při kterých byly zjišťovány hodnoty u pěti stanovených metrik pro každou z interakcí. Měření navíc probíhala ve dvou časových horizontech. Po zpracování měření bylo nejdříve pomocí F-testu ověřeno, že čas měření nemá na výsledky vliv. Poté byla naměřená data zpracována. Výsledky měření jsou prezentovány ve formě grafů v kapitole 7.3. Na výsledcích testování byly popsány rozdíly mezi vektorovými a rastrovými dlaždicemi a také mezi použitými formáty dlaždic a vybranými úložišti. Na závěr kapitoly věnující se testování pak bylo ještě demonstrováno několik jevů, které provází procházení aplikací, ale není možné je změřit.

Testování ukázalo, že vektorové dlaždice se ne vždy načítají rychleji než rastrové. Jejich hlavní přednost je ve snížení zátěže na server, v menším množství stažených dat a v příjemnějším pocitu při procházení aplikace. Díky knihovně umisťující dynamicky popisy na mapě navíc nemůže docházet k přílišnému zahuštění mapy popisem. Z výsledků u rastrových dlaždic vyplývá, že generování dlaždic na požadavek je několikanásobně pomalejší než zobrazování předgenerovaných dlaždic a má-li aplikace dosahovat minimálně podobného výkonu jako aplikace s vektorovými dlaždicemi, musí být dlaždice na zobrazovaném území generovány již před požadavkem uživatele.

V práci byly dosaženy hlavní vytyčené cíle. Z postupu uvedeného při tvorbě vytvořených aplikací mohou nadále čerpat studenti i vyučující. Analýza vytvořených aplikací prokázala rozdíly mezi rastrovými a vektorovými dlaždicemi, definovala shodné a odlišné znaky a zároveň nabídla prostor pro další zkoumání řešené problematiky.

POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE

ADAMEC, L. *Vektorové dlaždice ve webové kartografii*. Brno, 2016. Diplomová práce. Masarykova Univerzita.

ADSL.CZ | *Průběh měření rychlosti k internetu* [online]. 2019 [cit. 2019-04-14]. Dostupné z WWW: <http://www.adsl.cz/mereni-rychlosti-internetu>

ANTONIOU, Vyron, Jeremy MORLEY a Mordechai (Muki) HAKLAY. *Tiled Vectors: A Method for Vector Transmission over the Web*. Web and Wireless Geographical Information Systems [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, s. 56-71 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-10601-9_5

BERTOLOTTO, M., EGENHOFER M. J. *Progressive Transmission of Vector Map Data over the World Wide Web*. GeoInformatica. 2001, 5, 4, s. 345–373. ISSN 1573-7624. Bing Maps Tile System [online]. 2018 [cit. 2018-10-12]. Dostupné z WWW: <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/bb259689.aspx>

BOSTOCK, M. *TopoJSON*. 2016 [cit. 2018-10-11]. Dostupné z: <https://github.com/topojson/topojson/wiki>

Cartagen [online]. 2010 [cit. 2019-01-18]. Dostupné z: <https://github.com/jywarren/cartagen>

Documentation | Mapbox [online]. 2010 [cit. 2019-01-18]. Dostupné z WWW: <https://docs.mapbox.com/>

FU, Pinde a Jiulin SUN. *Web GIS: principles and applications*. Redlands, Calif.: ESRI Press, 2011. ISBN 978-1-58948-245-6.

GAFFURI, Julien. *Toward Web Mapping with Vector Data*. Geographic Information Science [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, s. 87-101 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-33024-7_7

Geography Markup Language [online]. 2018 [cit. 2018-10-11]. Dostupné z WWW: https://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=46568

GOODCHILD, Michael F. *Tiling large geographical databases*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1990, s. 135-146. ISBN 9783540469247.

HENNEBERGER, S. *Geoserver – Rendering Binary Vector Tiles* [online]. 2015 [cit. 2019-01-22]. Dostupné z WWW: <https://www.salzburgresearch.at/blog/geoserver-rendering-binary-vector-tiles/>

KOROTKIY, M. *Implementations of Mapbox MBTiles spec* [online]. 2018 [cit. 2019-01-22]. Dostupné z WWW: <https://github.com/mapbox/mbtiles-spec/wiki/Implementations>

LONGLEY, Paul, Michael F. GOODCHILD, D. J. MAGUIRE a David RHIND. *Geografické informace: systémy a věda*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, [2016]. ISBN 978-80-244-5008-7.

MACWRIGHT, T. *The end of CartoCSS* [online]. 2016 [cit. 2019-01-18]. Dostupné z WWW: <https://blog.mapbox.com/the-end-of-cartocss-da2d7427cf1>

Mapbox Style Specification [online]. 2019 [cit. 2019-01-16]. Dostupné z WWW: <https://docs.mapbox.com/mapbox-gl-js/style-spec/>

Mapbox Vector Tile Specification [online]. 2019 [cit. 2019-01-16]. Dostupné z WWW: <https://github.com/mapbox/vector-tile-spec>

MapCSS vs. CartoCSS [online]. 2013 [cit. 2019-01-16]. Dostupné z WWW: <https://gist.github.com/tmcw/4319642>

MAPNIK [online]. 2018 [cit. 2019-01-21]. Dostupné z WWW: <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Mapnik>

MapTiler. *Tiles à la Google Maps: Coordinates, Tile Bounds and Projection* [online]. 2018 [cit. 2019-03-15]. Dostupné z WWW: <https://www.maptiler.com/google-maps-coordinates-tile-bounds-projection/>

MASÓ, J., PONS, X., SINGH, R. *OGC WMTS and OSGeo TMS standards: motivations, history and differences*. [online]. 2010 [cit. 2018-10-11]. Dostupné z WWW: <http://2010.foss4g.org/presentations/3653.pdf>

MDN. *Cross-Origin Resource Sharing (CORS) – HTTP*. [online]. 2019 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z WWW: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/HTTP/CORS>

MICHÁLEK, M. *WebP obrázky: datově úsporná alternativa k JPEG, PNG i GIF* [online]. 2018 [cit. 2019-01-29]. Dostupné z WWW: <https://www.vzhurudolu.cz/prirucka/webp>

MORÁVKOVÁ, J. *Kartografická vizualizace vybraných dat ČÚZK podle směrnice INSPIRE*. Brno, 2015. Diplomová práce. Masarykova Univerzita.

NÉTEK, R. *Rich Internet Application pro podporu rozhodovacích procesů integrovaného záchranného systému*. Olomouc, 2015. Disertační práce. Univerzita Palackého v Olomouci.

NÉTEK, R. *Smart klient pro krizové řízení*. In: GIS Ostrava. Ostrava, 2014. [cit. 2018-10-11]. Dostupné z WWW: http://gisak.vsb.cz/GIS_Ostrava/GIS_Ova_2014/sbornik/papers/gis2014524ea25b9f226.pdf

NORDAN, Robert Patrick Victor. *An Investigation of Potential Methods for Topology Preservation in Interactive Vector Tile Map Application*. Trondheim, 2012. Diplomová práce. Norwegian University of Science and Technology.

NORMAN, P. *Serving Vector Tiles* [online]. 2016 [cit. 2019-01-22]. Dostupné z WWW: <http://www.paulnorman.ca/blog/2016/11/serving-vector-tiles/>

NOVAK, K. *What hours are peak website traffic hours?* [online]. 2014 [cit. 2019-04-17]. Dostupné z WWW: <https://growtraffic.com/blog/2014/10/hours-peak-website-traffic-hours>

OGC. *Web Coverage Service* [online]. [cit. 2018-10-11]. Dostupné z WWW: <http://docs.openeospatial.org/is/17-089r1/17-089r1.html>

OGC. *Web Feature Service* [online]. [cit. 2018-10-11]. Dostupné z WWW: <http://docs.openeospatial.org/is/09-025r2/09-025r2.html>

OGC. *Web Map Service* [online]. [cit. 2018-10-11]. Dostupné z WWW: http://portal.openeospatial.org/files/?artifact_id=14416

OPENMAPTILES. *Open vector tile schema for OpenStreetMap layers* [online]. 2019 [cit. 2019-03-04]. Dostupné z WWW: <https://openmaptiles.org/schema/>

PETERSON, Michael P. *Maps and the internet*. London: Elsevier, 2003. ISBN 978-0-08-044201-3.

PETERSON, Michael P. *The Tile-Based Mapping Transition in Cartography*. [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, 2012-12-7, s. 151-163 [cit. 2018-10-11]. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-19522-8_13

ŘÍHA, J. *Distribuce map pomocí webových služeb*. Praha, 2007. Bakalářská práce. České vysoké učení technické.

SAMPLE, John T. a Elias IOUP. *Tile-Based Geospatial Information Systems* [online]. Boston, MA: Springer US, 2010 [cit. 2018-10-11]. ISBN 978-1-4419-7630-7.

SE – Introduction – OGC e-Learning documentation [online]. 2018 [cit. 2019-01-04]. Dostupné z WWW: <http://cite.openeospatial.org/pub/cite/files/edu/se/text/main.html>

SHANG, X. *A Study on Efficient Vector Mapping With Vector Tiles Based on Cloud Server Architecture*. Calgary, 2015. Diplomová práce. University of Calgary.

SCHÖN, O. *Česko si pohoršilo v rychlosti připojení k internetu, mobilní sítě jsou ale nadprůměrné* [online]. 2017 [cit. 2019-04-13]. Dostupné z WWW:

<https://tech.ihned.cz/internet/c1-65993950-cesko-si-pohorsilo-v-rychlosti-pripojeni-k-internetu-mobilni-site-jsou-ale-nadprumerne>

StackExchange – Adding custom web tile layer to ArcMap? [online]. 2015–2018 [cit. 2019-01-30]. Dostupné z WWW: <https://gis.stackexchange.com/questions/174569/adding-custom-web-tile-layer-to-arcmap>.

STEFANAKIS, E. *Map Tiles and cached map services*. In: GoGeomatics. Magazine of GoGeomatics Canada. 2015. [cit. 2018-10-11]. Dostupné z WWW: http://www2.unb.ca/~estef/papers/go_geomatics_stefanakis_december_2015.pdf

STEFANAKIS, E. *Web mercator and raster tile maps: two cornerstones of online map service providers*. GEOMATICA [online]. 2017, 71(2), 100-109 [cit. 2018-10-11]. DOI: 10.5623/cig2017-203. ISSN 1195-1036. Dostupné z: <http://www.nrcresearchpress.com/doi/10.5623/cig2017-203>

ŠULC, D. *Identifikace a prostorové analýzy rozmístění komářích láníšť v CHKO Litovelské Pomoraví*. Olomouc, 2018. Diplomová práce. Univerzita Palackého v Olomouci.

TALHOFER, V., KUBÍČEK, P. *Možnosti aplikace adaptivní kartografie v krizovém řízení*. In: The science for population projection. 2012. [cit. 2018-10-11]. Dostupné z WWW: <http://www.population-protection.eu/prilohy/casopis/21/163.pdf>

TileMill [online]. 2019 [cit. 2019-01-21]. Dostupné z WWW: <https://tilemill-project.github.io/tilemill/docs/crashcourse/introduction/>

TUČEK, Ján. *Geografické informační systémy: principy a praxe*. Praha: Computer Press, 1998. CAD & GIS. ISBN 80-7226-091-x.

TURNER, A. *Vector Tiles Preview* [online]. 2015 [cit. 2019-01-21]. Dostupné z WWW: <https://www.esri.com/arcgis-blog/products/arcgis-enterprise/mapping/vector-tiles-preview/>

VOŽENÍLEK, Vít. *Diplomové práce z geoinformatiky*. Olomouc: Univerzita Palackého, 2002. ISBN 80-244-0469-9.

WADE, Tasha a Shelly SOMMER. *A to Z GIS: an illustrated dictionary of geographic information systems*. 2nd ed. Redlands, Calif.: Independent Publishers Group [distributor], 2006. ISBN 978-1-58948-140-4.

ZAVADIL, F. *Software pro zobrazování mapových dlaždic*. Praha, 2013. Diplomová práce. České vysoké učení technické.

PŘÍLOHY

SEZNAM PŘÍLOH

Vázané přílohy:

- Příloha 1 Tabulky s výsledky testování výkonu aplikací
- Příloha 2 Kód aplikace nad TileServer GL
- Příloha 3 Prohlášení o údržbě chodu aplikací

Volné přílohy

- Příloha 4 Poster
- Příloha 5 DVD

Struktura DVD

Adresáře:

- poster
- pouzite_skripty
- text_prace
- web

- Příloha 1** **Tabulky s výsledky testování výkonu aplikací**
- Příloha 2** **Kód aplikace nad TileServer GL**
- Příloha 3** **Prohlášení o údržbě chodu aplikací**

Příloha 1 Čas načtení mapy – pomalé připojení

	Iniciální načtení	Zoom na katedru	Posun na náměstí	Oddálení 3×	Oddálení 1×
Mapbox Studio	2017,32	5727,55	96,74	1091,82	556,19
TileServer GL – vektor	2372,70	6558,85	498,55	1971,30	728,75
TileServer PHP	2213,12	6749,45	638,06	2112,30	891,57
Dlaždice PBF	3122,00	6867,49	644,86	2111,21	1459,66
Dlaždice PNG	1425,31	4910,81	1049,99	1561,63	906,54
Dlaždice WebP	1334,32	4777,82	1026,24	1392,58	723,22
TileServer GL – PNG	2156,42	7118,12	2120,96	6494,43	1743,23
TileServer GL - WebP	1750,27	6108,04	1560,89	3588,25	1176,18

Příloha 1 Čas načtení mapy – rychlé připojení

	Iniciální načtení	Zoom na katedru	Posun na náměstí	Oddálení 3×	Oddálení 1×
Mapbox Studio	1255,66	5643,41	30,25	1032,55	600,39
TileServer GL – vektor	1345,61	5802,16	311,81	1019,56	533,18
TileServer PHP	1221,52	5876,15	373,10	1094,58	657,63
Dlaždice PBF	1481,16	5881,78	399,40	1520,44	1611,29
Dlaždice PNG	906,08	4430,03	1079,27	1285,07	542,20
Dlaždice WebP	841,39	4416,48	1089,80	1273,21	471,41
TileServer GL – PNG	1930,86	6958,74	2077,29	5458,57	1629,79
TileServer GL - WebP	1441,75	5940,06	1495,00	5161,49	976,13

Příloha 1 Průměrný čas načtení jedné dlaždice – pomalé připojení

	Iniciální načtení	Zoom na katedru	Posun na náměstí	Oddálení 3×	Oddálení 1×
Mapbox Studio	291,33	425,52	96,74	153,38	89,81
TileServer GL – vektor	178,82	305,98	118,69	148,58	68,38
TileServer PHP	239,16	447,14	191,78	212,41	154,55
Dlaždice PBF	330,65	466,68	184,21	344,83	424,77
Dlaždice PNG	302,39	178,01	106,77	242,38	268,19
Dlaždice WebP	185,84	94,90	85,94	164,19	192,47
TileServer GL – PNG	704,76	1003,90	534,43	1915,47	617,77
TileServer GL - WebP	481,98	710,32	265,57	1053,72	370,32

Příloha 1 Průměrný čas načtení jedné dlaždice – rychlé připojení

	Iniciální načtení	Zoom na katedru	Posun na náměstí	Oddálení 3×	Oddálení 1×
Mapbox Studio	151,71	237,55	30,25	88,71	139,14
TileServer GL – vektor	112,19	141,20	65,39	76,88	64,16
TileServer PHP	130,61	246,38	99,21	117,94	132,83
Dlaždice PBF	132,06	291,33	94,36	187,29	469,87
Dlaždice PNG	197,10	86,70	70,33	125,87	164,66
Dlaždice WebP	176,86	90,20	67,66	126,72	143,65
TileServer GL – PNG	699,72	1026,97	524,66	1776,50	685,37
TileServer GL - WebP	476,46	709,32	246,86	1613,12	398,91

Příloha 1 Počet požadavků na server – pomalé připojení

	Iniciální načtení	Zoom na katedru	Posun na náměstí	Oddálení 3×	Oddálení 1×
Mapbox Studio	9	94	1	12	13
TileServer GL – vektor	16	189	3	29	30
TileServer PHP	19	191	3	29	29
Dlaždice PBF	19	180	3	22	28
Dlaždice PNG	35	189	40	76	46
Dlaždice WebP	35	215	40	81	50
TileServer GL – PNG	35	113	40	63	53
TileServer GL - WebP	35	131	40	64	51

Příloha 1 Počet požadavků na server – rychlé připojení

	Iniciální načtení	Zoom na katedru	Posun na náměstí	Oddálení 3×	Oddálení 1×
Mapbox Studio	9	83	1	6	13
TileServer GL – vektor	16	172	3	16	30
TileServer PHP	18	173	3	15	29
Dlaždice PBF	18	180	3	17	30
Dlaždice PNG	35	257	40	83	44
Dlaždice WebP	35	262	40	85	42
TileServer GL – PNG	35	108	40	61	48
TileServer GL - WebP	35	130	40	61	46

Příloha 1 Počet požadavků na server se stažením dlaždice – pomalé připojení

	Iniciální načtení	Zoom na katedru	Posun na náměstí	Oddálení 3×	Oddálení 1×
Mapbox Studio	9	46	1	11	13
TileServer GL – vektor	16	105	2	17	20
TileServer PHP	19	79	2	15	19
Dlaždice PBF	19	70	2	13	18
Dlaždice PNG	35	185	40	68	37
Dlaždice WebP	35	214	40	73	40
TileServer GL – PNG	35	103	40	49	37
TileServer GL - WebP	35	125	40	49	39

Příloha 1 Počet požadavků na server se stažením dlaždice – rychlé připojení

	Iniciální načtení	Zoom na katedru	Posun na náměstí	Oddálení 3×	Oddálení 1×
Mapbox Studio	9	48	1	6	13
TileServer GL – vektor	16	102	2	11	20
TileServer PHP	18	80	2	11	19
Dlaždice PBF	18	81	2	13	20
Dlaždice PNG	35	257	40	78	33
Dlaždice WebP	35	262	40	80	32
TileServer GL – PNG	35	98	40	45	32
TileServer GL - WebP	35	123	40	47	30

Příloha 1 Velikost stažených dat – pomalé připojení

	Iniciální načtení	Zoom na katedru	Posun na náměstí	Oddálení 3×	Oddálení 1×
Mapbox Studio	1,92	4,13	0,18	1,45	0,21
TileServer GL – vektor	2,30	6,05	0,30	1,70	0,50
TileServer PHP	2,35	5,33	0,26	1,52	0,44
Dlaždice PBF	2,87	4,53	0,26	1,35	0,36
Dlaždice PNG	2,07	5,47	0,81	1,86	0,73
Dlaždice WebP	1,44	2,03	0,28	0,66	0,24
TileServer GL – PNG	1,87	3,05	0,81	1,27	0,70
TileServer GL - WebP	1,38	1,21	0,28	0,43	0,21

Príloha 1 Velikost stažených dat – rychlé připojení

	Iniciální načtení	Zoom na katedru	Posun na náměstí	Oddálení 3×	Oddálení 1×
Mapbox Studio	1,92	4,78	0,18	0,76	0,21
TileServer GL – vektor	2,26	6,32	0,26	1,08	0,52
TileServer PHP	2,27	5,54	0,26	1,08	0,44
Dlaždice PBF	2,82	5,37	0,26	1,36	0,48
Dlaždice PNG	2,08	7,91	0,81	2,05	0,67
Dlaždice WebP	1,46	2,59	0,28	0,71	0,20
TileServer GL – PNG	1,89	2,90	0,81	1,32	0,64
TileServer GL - WebP	1,40	1,19	0,28	0,43	0,17

Příloha 2 Kód aplikace nad TileServer GL

```
<!DOCTYPE html>
<html>
<head>
  <meta charset='utf-8' />
  <title>DP - TileServer GL - vektor - DP - fpavlicek.cz</title>
  <meta name='viewport' content='initial-scale=1, maximum-scale=1,user-
scalable=no' />
  <link href='http://fpavlicek.cz/dp/images/fpavlicek-icon.png' rel='shortcut
icon' type='image/png'>

  <!-- Mapbox GL JS -->
  <script src='./mapboxgl/mapbox-gl.js'></script>
  <link href='./mapboxgl/mapbox-gl.css' rel='stylesheet' />

  <style>
    body { margin:0; padding:0; }
    #map { position:absolute; top:0; bottom:0; width:100%; }

    #zoominfo {
      display: block;
      position: absolute;
      top: 150px;
      right: 10px;
      width: 120px;
      padding: 10px;
      border: 1px solid #bfbfbf;
      border-radius: 7px;
      font-size: 14px;
      font-weight: bold;
      text-align: center;
      color: #222;
      background: #fff;
    }

    #hranicedlazdic {
      display: block;
      position: absolute;
      top: 200px;
      right: 10px;
      padding: 10px;
      border: 1px solid #bfbfbf;
      border-radius: 7px;
      font-size: 14px;
      font-weight: bold;
      text-align: center;
      vertical-align: middle;
      color: #222;
      background: #fff;
    }
  </style>
</head>
</html>
```

```
.dropbtn {
  background-color: #E24F31;
  color: white;
  position: absolute;
  left: 20px;
  top: 20px;
  width: 160px;
  padding: 16px;
  font-size: 16px;
  font-weight: bold;
  border: 1px;
  border-color: #b24d39;
  border-radius: 7px;
  cursor: pointer;
}

.dropdown {
  position: relative;
  display: block;
}

.dropdown-content {
  display: none;
  position: absolute;
  left: 20px;
  top: 20px;
  background-color: #f9f9f9;
  min-width: 160px;
  box-shadow: 0px 8px 16px 0px rgba(0,0,0,0.2);
  z-index: 1;
}

.dropdown-content a {
  color: black;
  padding: 12px 16px;
  text-decoration: none;
  display: block;
}

.dropdown-content a:hover {background-color: #f1f1f1}

.dropdown:hover .dropdown-content {
  display: block;
}

.dropdown:hover .dropbtn {
  background-color: #b24d39;
}

.btn-group .button {
  background-color: #E24F31; /* Green */
```

```

        border: 1px;
        border-color: #b24d39;
        color: white;
        padding: 15px 32px;
        text-align: center;
        text-decoration: none;
        display: inline-block;
        font-size: 12px;
        cursor: pointer;
        width: 160px;
        display: block;
    }

    .btn-group .button:not(:last-child) {
        border-bottom: none; /* Prevent double borders */
    }

    .btn-group .button:hover {
        background-color: #b24d39;
    }
</style>
</head>
<body>
    <div id='map'></div>
    <div id='zoominfo'></div>
    <div id='hranicedlazdic'>
        <label><input id='zobraz-hranice-dlazdic' type='checkbox'> Zobrazit obrys
        dlaždic</label></div>
    <div class="dropdown">
        <button class="dropbtn">Testování</button>
        <div class="dropdown-content">
            <div class="btn-group">
                <div id="tlacitko1"><button class="button">Zoom na katedru
            </button></div>
                <div id="tlacitko2"><button class="button">Posun na náměstí
            </button></div>
                <div id="tlacitko3"><button class="button">Oddálení 3x</button></div>
                <div id="tlacitko4"><button class="button">Oddálení 1x</button></div>
            </div>
        </div>
    </div>
    <script>
        var map = new mapboxgl.Map({
            attributionControl: false,
            container: 'map', // container id
            style: http://ec2-18-196-2-219.eu-central-
1.compute.amazonaws.com/styles/klokantech-basic/style.json', // styl
            center: [16.236, 49.803], // úvodní umístění
            zoom: 6.5, // úvodní zoom
            collectResourceTiming: true

```

```

});

// Zoom a rotační tlačítka
map.addControl(new mapboxgl.NavigationControl()
);

// Tlačítko na full screen
map.addControl(new mapboxgl.FullscreenControl({
container: document.querySelector('body')
}))
);

// Po kliknutí zobraz hranice dlaždic
document.getElementById('zobraz-hranice-dlazdic').onclick = function() {
map.showTileBoundaries = !!this.checked;
};

// Zobrazení úvodního zoomu
var prvnizoom = map.getZoom();
document.getElementById("zoominfo").innerHTML = 'Úroveň zoom: ' + prvnizoom;

// Funkce pro zobrazování zoomu s přiblížením
map.on('zoom', function (e) {
var zoom = map.getZoom();
zoom = zoom.toFixed(2);
document.getElementById("zoominfo").innerHTML =
'Úroveň zoom: ' + zoom;
});

// Funkce pro přiblížení na Olomouc
document.getElementById("tlacitko1").addEventListener('click', function() {
map.flyTo({
center: [17.265, 49.5937],
zoom: 17,
duration: 6000
});
});

// Funkce pro posun vlevo
document.getElementById("tlacitko2").addEventListener('click', function () {
map.panTo([17.251, 49.5938], {
duration: 1500
});
});

// Funkce pro oddálení mapy o tři úrovně
document.getElementById("tlacitko3").addEventListener('click', function () {
map.zoomTo(map.getZoom() - 3, {
duration: 1500
});
});

```

```
});  
});  
  
// Funkce pro oddálení mapy o jednu úroveň  
document.getElementById("tlacitko4").addEventListener('click', function () {  
  map.zoomTo(map.getZoom() - 1, {  
    duration: 500  
  });  
});  
  
// Vlastní tiráž  
map.addControl(new mapboxgl.AttributionControl({  
  compact: false,  
  customAttribution: 'F. PAVLÍČEK, Univerzita Palackého v Olomouci'})  
  );  
  
// Měřítko  
var scale = new mapboxgl.ScaleControl({  
  maxWidth: 150,  
  unit: 'metric'  
});  
map.addControl(scale);  
</script>  
</body>  
</html>
```

PROHLÁŠENÍ

Já, Bc. František Pavlíček, tímto prohlašuji, že aplikace, vytvořené v rámci diplomové práce „Analýza generování rastrových a vektorových mapových dlaždic“, budu udržovat v chodu minimálně do 13. 5. 2022.



Bc. František PAVLÍČEK