

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

Přírodovědecká fakulta

Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie

Studijní program: Geografie (navazující magisterské studium)

Studijní obor: Kartografie a geoinformatika



**VZTAH MORFOMETRICKÝCH CHARAKTERISTIK
TERÉNU A SÍŤOVÝCH ANALÝZ V PROSTŘEDÍ GIS**

**RELATIONSHIP BETWEEN MORPHOMETRIC
CHARACTERISTICS OF THE TERRAIN AND NETWORK
ANALYSIS IN GIS**

Diplomová práce

Bc. Jan Kufner

Praha 2013

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Tomáš Hudeček, Ph.D.

Děkuji svému vedoucímu diplomové práce RNDr. Tomáši Hudečkovi, Ph.D. za cenné rady a odbornou pomoc při zpracování mé práce. Rád bych také poděkoval společnosti Central European Data Agency, a.s. za zapůjčení dat StreetNET a Českému úřadu zeměměřickému a katastrálnímu za poskytnutí dat ZABAGED a DMR-4G. Dále bych chtěl poděkovat Bc. Kateřině Novotné za pomoc při pozemní kampani. Za zapůjčení přístrojů GPS děkuji Mgr. Lence Hladíkové a RNDr. Janu Vodňanskému. A v neposlední řadě také děkuji rodině za podporu v průběhu celého studia.

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne 25. 8. 2013

.....

Jan Kufner

Vztah morfometrických charakteristik terénu a síťových analýz v prostředí GIS

Abstrakt

Hlavním cílem diplomové práce je sestavení metodiky a automatizace procesu kalibrování síťového grafu v závislosti na hodnotách morfometrických charakteristik a pohybovém vektoru. Výsledné morfometrické hodnoty terénu jsou zjištěny na základě matematických a kartografických metod pro vyjádření průběhu linie, z nichž nejpřesnější je dále použita v síťových analýzách v prostředí GIS nad digitálními modely silniční sítě a digitálními modely terénu, které byly pro tyto účely na základě zkoumání vybrány jako nejvhodnější.

Vztah mezi hodnotami morfometrickými a hodnotami vhodnými pro využití v síťových analýzách (rychlost, čas...) je prozkoumán na konkrétních příkladech ve vhodně vybraném území za využití vhodných dopravních prostředků, kterým bylo určeno jízdní kolo. Praktická část pro ověření funkčnosti navržené metodiky je porovnána s dalšími modely dostupnosti, dostupnými webovými mapovými portály a plánovači tras. Tento proces ohodnocení dopravní sítě založený na vybraných parametrech byl automatizován v jazyce Python jako nástroj do softwaru ArcGIS, který je přílohou této diplomové práce.

Klíčová slova: průměrná rychlost, sklon, křivost, digitální model reliéfu, Python, síťové analýzy, cyklodoprava, optimální cesta

Relationship between morphometric characteristics of the terrain and network analysis in GIS

Abstract

The main objective of the diploma thesis is creation of methodology and automatization of calibration process of network graph based on the values of morphometric characteristics and motion vectors. The resulting morphometric values of the terrain have been detected on the basis of mathematical and cartographic methods for line course expression. The most accurate one has been used in GIS network analysis over the road network and digital terrain models, which were chosen as the most appropriate for this purpose.

Relationship between morphometric values and values suitable for use in network analysis (speed, time, ...) has been studied using specific examples in appropriately selected territory with using selected vehicle, which was designated as a bicycle. The practical part for the verification of functionality of the suggested methodology has been compared with other models of accessibility, available web-map portals and route planners. The process of transport network evaluation based on selected parameters has been automated in Python programming language as a tool in ArcGIS software, which is attached to the diploma thesis.

Keywords: average speed, slope, curvature, digital elevation model, Python, network analysis, bike transport, optimal route

OBSAH

1 Úvod.....	10
1.1 Cíle práce	11
1.2 Stanovení výzkumných otázek.....	12
2 GIS a dopravní modelování	14
2.1 Datové dopravní modely v GIS.....	14
2.2 Parametrické ohodnocování grafů.....	15
2.3 Morfometrické parametry	17
2.3.1 Sklon.....	18
2.3.2 Křivost	19
2.3.3 Fyzikální podstata.....	21
2.3.4 Klasifikování segmentů podle křivosti a sklonu	24
2.3.5 Rešerše metodik výpočtu morf. charakteristik.....	25
2.3.6 Určování parametrů v prostředí GIS.....	28
2.4 Zohlednění dalších parametrů	30
2.5 Výběr parametrů.....	33
2.6 Síťové analýzy.....	33
3 Identifikace a výběr datových sad	36
3.1 Digitální modely reliéfu	38
3.1.1 Druhy dat	38
3.1.2 Identifikace zdrojů	39
3.1.3 Požadavky a zdůvodnění výběru	41
3.2 Cestní síť	41
3.2.1 Identifikace zdrojů	43
3.2.2 Požadavky a zdůvodnění výběru	45
4 Vztah morfometrie a síťových analýz	48
4.1 Použitý SW.....	48
4.2 Preprocessing	49
4.3 Určení podélného sklonu.....	50
4.3.1 Určení kritických bodů	55
4.3.2 Určení prahové hodnoty	58
4.4 Určování křivosti komunikace	60
4.5 Směr pohybu po síti.....	64

4.6	Převod morf. parametrů na pohybový vektor.....	65
4.6.1	Terénní průzkum – popis území	65
4.6.1	GPS data	66
4.6.2	Regresní analýza.....	69
4.6.3	Určování trendu – převodní rovnice	75
4.7	Výpočet času	78
4.8	Algoritmizace	79
4.8.1	Matematický zápis	80
4.8.2	Textový popis	82
5	Aplikace a hodnocení výsledků.....	85
5.1	Parametr h	85
5.2	Detekce kritických bodů.....	86
5.3	Výpočet hodnot sklonu a křivosti.....	87
5.3.1	Porovnání s předchozími metodikami	91
5.4	Hodnocení v síťových analýzách	92
5.4.1	Hledání cesty a výpočet časové vzdálenosti	93
5.5	Srovnání s mapovými portály a plánovači tras	96
5.6	Shrnutí výsledků.....	97
6	Diskuze a závěr.....	98
6.1	Diskuze.....	98
6.2	Závěr	103

SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ

Tab. 1.	Základní členění síťových grafů.....	16
Obr. 1.	Ohodnocený orientovaný graf	16
Obr. 2.	Parametry ovlivňující ohodnocení síťového grafu	17
Obr. 3.	Normálová křivost povrchu	20
Obr. 4.	Konvexní a konkávní tvar segmentu silniční sítě.....	21
Tab. 2.	Přehled základních geomorfologických tvarů	21
Obr. 5.	Vliv sil působících na těleso v klidu.....	22
Obr. 6.	Síly působící na těleso na nakloněné rovině.....	23
Obr. 7.	Zjednodušená dopravní síť se čtyřmi uzly A-D s jejich vzdáleností.....	25
Tab. 3.	Počet přímých spojení mezi dopravními uzly v dopravní síti.	25
Obr. 8.	Výpočet sklonitosti silniční sítě.....	27
Obr. 9.	Způsob výpočtu podélného sklonu pro úsek silniční sítě	27
Obr. 10.	Princip výpočtu derivace	29
Obr. 11.	Princip výpočtu křivosti v SW ArcGIS	29
Obr. 12.	Výpočet křivolakosti úseku PK	32
Obr. 13.	Schéma vybraných parametrů a jejich zdrojových dat	33
Tab. 4.	SW využívané pro síťové analýzy v dopravě	34
Tab. 5.	Porovnání standardů kvality prost. dat z hlediska výskytu prvků kvality	36
Tab. 6.	Požadované hodnoty kritérií pro výběr datové sady.....	41
Obr. 14.	Dvoudimenzionální silniční síť	42
Tab. 7.	Hodnotící kritéria pro digitální modely silniční sítě.....	46
Obr. 15.	Schéma přípravy vstupních dat DMR	49
Obr. 16.	Výpočet sklonu.....	50
Tab. 8.	Velikost délky linií zkoumaného území po povrchu a ve 2D rozměru	51
Obr. 17.	Linie s jednotlivými segmenty a lomovými body	51
Obr. 18.	Rozdělení linie ve stacionárních bodech	53
Obr. 19.	Schéma výpočtu podélného sklonu	54
Obr. 20.	Základní popis algoritmu při rozdělení linie	56
Obr. 21.	Linie s lomovými body a mezilehlými lomenými čarami s DMR v GIS	56

Obr. 22.	Určení hodnoty prahové hodnoty h	58
Obr. 23.	Inflexní bod x_1 a x_4	61
Obr. 24.	Vyhodnocení kritických bodů při nestandardních situacích.....	62
Obr. 25.	Ilustrace navržené metodiky výpočtu křivosti pro linové prvky	63
Obr. 26.	Procesní výpočtové schéma křivosti.....	63
Obr. 27.	Orientace linií v prostředí GIS.....	64
Obr. 28.	GPS trackpointy naježděné terénním průzkumem	67
Obr. 29.	Lokalizace bodů na linie s využitím vyhledávacího parametru.....	68
Obr. 30.	Schéma terénního výzkumu od sběru dat až po testování v síťových analýzách ...	69
Tab. 9.	Výpočet korelačních koeficientů pro testování nezávislosti proměnných.....	70
Obr. 31.	3D graf závislosti sklonu a křivosti na závislé rychlosti na zpevněných (vlevo) a nezpevněných (vpravo) cestách.....	70
Tab. 10.	Tabulka analýzy rozptylu zpevněných komunikací	71
Tab. 11.	Tabulka analýzy rozptylu nezpevněných komunikací.....	72
Tab. 12.	Koeficienty determinace pro složitější model	73
Tab. 13.	Koeficienty determinace pro jednodušší model	73
Obr. 32.	Zobrazení trendových křivek pro zpevněné komunikace	76
Tab. 14.	Hodnocení přesnosti regrese jednotlivých modelů u zpevněných PK)	77
Obr. 33.	Zobrazení trendových křivek pro nezpevněné komunikace	77
Tab. 15.	Hodnocení přesnosti regrese jednotlivých modelů u zpevněných PK.....	78
Obr. 34.	Dialogové okno nástroje Sklonitost.....	79
Obr. 35.	Ilustrace průběhu linie a matematického zápisu algoritmu pro výpočet sklonu	80
Obr. 36.	Ilustrace průběhu linie a matematického zápisu algoritmu pro výpočet křivosti ...	81
Obr. 37.	Vizuální testování přesnosti parametru h	86
Obr. 38.	Testování funkčnosti hodnot sklonu a křivosti.....	88
Obr. 39.	Porovnání výpočtů sklonu úseků s funkcí Add Surface Information	88
Obr. 40.	Nepřesně určené linie s extrémní hodnotou křivosti	89
Tab. 16.	Výsledné hodnoty přesnosti 10 nejlepších modelů dostupnosti v kombinaci s metodami určení morf. parametrů za využití síťových analýz	97

PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK

AOPK	Agentura ochrany přírody a krajiny
BPMN	Business process modeling notation
CEDA	Central European Data Agency, a.s.
CENIA	Česká informační agentura životního prostředí
CHMI	Český hydrometeorologický ústav
ČR	Česká republika
ČSN	Československá státní norma
ČSÚ	Český statistický úřad
ČUZK	Český úřad zeměměřický a katastrální
DB	Databáze
DMÚ	Digitální model území
DMR	Digitální model reliéfu
FTK UPOL	Fakulta tělesné kultury Univerzity Palackého
GDF	Geographic Data Files
GIS	Geoinformační systémy
GN	Global Network
GPS	Global Position System
HZS	Hasičský záchranný sbor
IDLE	Integrated Development Enviroment
IDW	Inverse Distance Weighted
ISO	International Organazation for Standadization
IZS	Integrovaný záchranný systém
JSDI	Jednotný systém dopravních informací
LIDAR	Light Detection And Ranging
MD ČR	Ministerstvo dopravy a spojů České republiky

MHD	Městská hromadná doprava
MTB	Mountain Bike
NDIC	Národní dopravně-informační centrum
ODF	Open Document Format for Office Applications
PK	Pozemní komunikace
RDS-TMC	Radio Data System – Traffic Message Channel
RDF	Resource Description Framework
ŘSD	Ředitelství silnic a dálnic
SDB	Silniční databanka Ostrava
SHP	Shapefile
SR	Slovenská republika
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
S-JTSK	Systém jednotné trigonometrické sítě katastrální
SW	Software
TIN	Triangulated Irregular Network
TP	Technické podmínky
ULS	Uzlový lokalizační systém
VGHMÚř	Vojenský geografický a hydrometeorologický úřad
VŠB	Vysoká škola báňská
VUT	Vysoké učení technické
WGS	World Geodetic System
XML	Extensible Markup Language
ZABAGED	Základní báze geografických dat

1 ÚVOD

„Již od počátku lidstva byla doprava hnacím strojem růstu, bez které by nebyl obchod ani města“ (Greene, 1997).

Doprava patří mezi základní potřeby lidstva. Především díky rozdílnému potenciálu různých zemí a krajin světa, lidé nenacházejí ve svém okolí všechno to, co potřebují k životu a jsou nuceni přemísťovat své hmotné statky i sebe sama (Thill, 2000). K přemísťování toho, co potřebují, využívají dopravních cest. Soubor vzájemně propojených dopravních cest se nazývá dopravní síť. Ta je nedílnou součástí každého dopravního systému. Vývoj v oblasti motorizované silniční dopravy je odjakživa aktuálním tématem, a proto vznikají stále ucelenější a modernější dopravní systémy, které jsou vzhledem k vysoké integraci a s tím související lidské závislosti již nutností současného života.

Silniční doprava pro tyto účely využívá dopravní cesty (silnice, dálnice, místní a účelové komunikace,...). Ty však díky stále větší automobilizaci, globalizaci a s tím souvisejícím dopravním kongescím přestávají kapacitně postačovat a lidé jsou nuceni zvažovat využití jiného způsobu zajištění svých přepravních potřeb. Zároveň také musí přemýšlet o efektivitě a ceně, kolik za takové potřeby musí vynakládat. I proto jsou nuceni optimalizovat své náklady na přemísťování svých statků a hlavně i sebe sama. Začíná tak docházet k přesunování části obyvatel k využívání takových dopravních prostředků, které se těmto dopravním kongescím dokáží efektivně vyhnout díky své flexibilitě a zároveň poskytnout v rozumném čase splnění přepravní potřeby s nízkou finanční náročností.

Při tomto přesouvání, při plánování tras, výpočtu dojezdových dob, dopravní dostupnosti a obslužnosti je proto potřeba mít k dispozici ty nejpřesnější dopravní modely, jejichž součástí jsou i modelace pohybu po cestní síti, jež je zajišťována např. i pomocí síťových analýz.

Narozdíl od automobilové dopravy není tato problematika v ostatních dopravních módech tak obšírně řešena v závislosti na jejich potřebách a specifikách, i když je prokazatelné, že na samotnou jízdu jiných dopravních prostředků působí mnohem více vnějších a především odlišných vlivů (např. **sklon terénu**, vzdálenost, infrastruktura, **povrch**, bezpečnost atd.) než u automobilové dopravy. S ohledem na tento fakt byla proto práce zaměřena především na prokázání vztahu těchto odlišných faktorů, mezi něž patří právě morfometrické charakteristiky reliéfu a možnosti jejich vyjádření pomocí matematických rovnic a kartografických prostředků do síťových analýz, navigačních a dostupnostních modelů v prostředí geoinformačních systémů.

Jedním z módů dopravy, kde může být tento vztah exaktně určen i v rámci možností autora, je doprava cyklistická. Ta se řadí vedle pěší dopravy mezi významné alternativy k motorové dopravě, která dnes ve většině případů stále převládá. Zejména v městském prostředí má cyklistika značný potenciál udržitelného rozvoje a představuje možnost vypořádat se s každodenními problémy, které zde vytváří neúměrně intenzivní automobilová doprava. V mimoměstských oblastech pak zase slouží k rekreačním účelům, v některých lokalitách pak i pro základní dopravní obslužnost. Cyklistika navíc přináší řadu výhod, které jsou pro jiné formy dopravy těžko dostupné. Je to zejména šetrnost vůči životnímu prostředí, prostorová nenáročnost, vysoká mobilita v dopravně přetížených sídlech a účinná obrana vůči civilizačním chorobám. Zdá se, že i v České republice (dále jen ČR) je tento trend pomalu vnímán a

cyklistická doprava si vytváří svoji donedávna opomíjenou pozici při dopravním plánování a stanovování obslužnosti.

Základním datovým podkladem, bez něhož by žádný dopravní systém nemohl efektivně fungovat, je navigační/dostupnostní databáze neboli digitální databáze reprezentující silniční a uliční síť takovým způsobem, aby aplikace na ní vystavěné mohly řidiče vést po této síti správným a korektním způsobem v souladu s dopravními předpisy a na základě správně vypočítané cestovní vzdálenosti, která je ovlivňována mnoha faktory. Určení a zapojení těchto faktorů prozatím v módu cyklo dopravy chybí nebo je velmi nepřesně extrapolováno na základě dopravy motorizované, avšak bez využití parametrů terénu. Pro přesné modelování pohybu po síti je tak nutno zohlednit a mít nastavenou jejich velikost pro určení pohybového vektoru a tu efektivně, automatizovaně a rychle zanášet do zdrojových databází. Ta totiž musí svým datovým modelem, obsahem i rozsahem dostát požadavkům širokého spektra uživatelů především v oblasti dopravních, dostupnostních a (cyklo) navigačních systémů.

1.1 Cíle práce

Diplomová práce se proto zabývá modelováním dopravy pomocí nástrojů geoinformačních systémů ve vztahu k morfometrickým charakteristikám terénu, hledáním jejich vztahu a jeho vyjádření pomocí jasně definovatelných převodních rovnic a korektně ohodnoceného modelu dopravní sítě. A to především v módu dopravy, kde tato potřeba nabývá největšího smyslu, tedy dopravě cyklistické a je možné ji v rámci možností autora ověřit.

Hlavním cílem diplomové práce proto je sestavení postupu (metodiky) a automatizace procesu „oceňování“ dopravní sítě v závislosti nejen na hodnotách morfometrických charakteristik terénu.

V prvním podcíli bylo potřeba zjistit doposud použité metodiky pro výpočet morfometrických charakteristik dopravní sítě v digitální podobě. Zároveň byly také rešeršně zajištěny všechny stávající existující digitální modely cestní sítě a digitálního modelu reliéfu (dále jen DMR) používaného na celém území ČR a zkoumána vhodnost jejich využití pro tyto účely. Problematika síťových analýz a parametrů, které ovlivňují rychlost na komunikacích, je obecně popsána v další části rešeršního obsahu.

Cílem je také vylepšení, aby vybraný vyhledávací algoritmus dokázal při trasování zohlednit dle výpočtu morfometrických charakteristik pohyb po síti ve směru záporného či kladného sklonu (z kopce či do kopce – více v kap. 2.3.1). Toto rozdělení je velmi důležité při plánování tras a výpočtu dojezdové vzdálenosti právě v cyklistické či např. nákladní dopravě. Cílový zpřesněný model by zároveň neměl počítat průměrný sklon jen z rozdílu nadmořských výšek koncového a počátečního bodu, ale z váženého průměru vzdáleností jednotlivých segmentů linie. Využití této metodiky bude velmi vhodné např. v oblastech s častou změnou sklonu, méně hustou sítí silnic a cest a z toho vyplývající vyšší délkou jednotlivých úseků, ale např. také v městských oblastech, kde je doprava ovlivňována dalšími faktory a musí se řídit více dopravním značením, pro zlepšení možností nasazení tohoto druhu dopravy na jejich území, viz např. bikesharing apod.

Dalším cílem práce by mělo být odlišení nejen úseků s kladnou či zápornou hodnotou sklonu, ale také s vertikálním zakřivením (konvexitou či konkávností – více v kap. 2.3.2) daného segmentu silniční sítě ve vztahu k jeho ocenění pro plánování trasy.

Posledním cílem by mělo být celý tento proces ohodnocení dopravní sítě založeného na vybraných parametrech automatizovat ve vybraném programovacím jazyce jako nástroj do geoinformačního (dále jen GIS) softwaru. Tato část by však měla sloužit pouze jako potvrzení splnění výše uvedených cílů.

Vztah mezi hodnotami morfometrickými a hodnotami vhodnými pro využití v síťových analýzách (rychlost, čas...) by měl být jak rešeršně, tak i rekognoskačně zkoumán na konkrétních příkladech ve vhodně vybraném území. Aplikační část pro ověření funkčnosti metodiky bude nakonec založena na testování a hodnocení vybraných parametrů ve zvoleném GIS systému, v terénním výzkumu s vhodně vybraným dopravním prostředkem a porovnáním s webovými mapovými portály.

Před realizací celé práce bylo potřeba na základě rešeršní části stanovit některé důležité otázky popisující výzkumné problémy, které tuto práci budou provázet a na které bude potřeba v závěru najít odpověď za pomoci stanovených postupů a výsledků. Tyto výzkumné otázky tak lze do jisté míry považovat za jednotlivé části cílů práce uvedených výše.

1.2 Stanovení výzkumných otázek

I. Jak zautomatizovat proces zohlednění podélného sklonu a křivosti komunikací v síťových analýzách v GIS?

Dosavadní výzkumy síťových analýz, potažmo dostupností, se buď vztahem DMR a komunikací vůbec nezabývají, nebo se s ním nejsou schopny dostatečně vypořádat, což může vést k nedostatečné přesnosti a reálnosti dosahovaných výsledků. Vyřešení tohoto problému v prostředí GIS by umožnilo provádět dané analýzy mnohem přesněji. Zautomatizování by navíc značně zjednodušilo aplikaci daných postupů. Tato problematika však v sobě skrývá dílčí výzkumné otázky, se kterými bude nutné se postupně vypořádat. Generální otázkou je, jestli je vůbec možné zohlednit podélný sklon a křivost do řešení síťových analýz?

II. Jak popsat vztah DMR a síťových analýz a jaké jsou podmínky pro použití daných algoritmů v prostředí GIS?

Další důležitou odpovědí nutnou pro sestavení skládky daného výzkumu je způsob číselného vyjádření morfometrických charakteristik komunikace. Je třeba analyzovat a porovnat použitelné algoritmy a vybrat (a dle potřeby upravit nebo vytvořit zcela nový) nejvhodnější algoritmus pro daný účel. Otázka tedy zní, je vhodné zvolit modifikace současně využívaných algoritmů nebo vytvořit zcela novou metodiku a algoritmus?

III. Jakým způsobem zohlednit podélný sklon a křivost komunikace v době nutné k jejímu překonání?

Dále je třeba určit vazbu mezi vyjádřením morfometrických charakteristik komunikace a rychlostí (k vyjádření času pro překonání dané linie a dalšímu využití v síťových analýzách). V tomto ohledu je nutné najít převod hodnot morfometrických charakteristik na hodnotu využitelnou v síťových analýzách za pomoci matematických vztahů. Takovou hodnotou je průměrná rychlost na daném segmentu. Převodní rovnice bude vycházet mj. i z terénního výzkumu na daném území. Výzkumná otázka zde stojí vůbec na existenci (nalezení) takového číselného vyjádření převodní rovnice a její verifikace.

IV. Jakým způsobem zohlednit DMR při orientovaném pohybu po síti?

V tomto bodě je potřeba zohlednit možnost obou/jedno-směrného pohybu po síti a rozdíl při ohodnocení hrany v jednotlivých směrech, kde je nutné zautomatizovat proces přiřazení správných hodnot sklonu pro každý směr pohybu do výsledné databáze.

V. Jakým způsobem zohlednit další parametry terénu a síťových modelů při pohybu po síti?

Zároveň je potřeba zohlednit možnost vlivu dalších parametrů mající vliv na pohyb po síti a jejich vliv na ohodnocení hrany v jednotlivých směrech. Zde je nutné zautomatizovat proces vlivu těchto parametrů na výsledné hodnoty pro každý směr pohybu na daném segmentu do výsledné databáze.

VI. Jakým způsobem implementovat rozdílné ohodnocení směru hrany při volbě nejkratší cesty?

V této výzkumné otázce je potřeba najít způsob, jak algoritmus pro hledání nejkratší cesty dokáže při jejím hledání použít vždy tu správnou hodnotu ohodnocení grafu z databáze. Základní otázkou je, jestli jsou GIS systémy schopny tento problém vyřešit bez zasahování do jimi používaného vyhledávacího (routovacího) algoritmu nebo bude nutné vytvořit vlastní či modifikovaný algoritmus pro hledání optimální trasy.

VII. Jak celý postup realizovat a verifikovat v prostředí GIS?

Samozejmě je nutné popsat daný postup pomocí programovacího jazyka tak, aby bylo možné jej použít v prostředí GIS. Budou popsána i kritická místa a důležité podmínky pro správné fungování daného postupu (např. podmínky pro vstupní data apod.). Dojde také k vytvoření zcela nového nástroje, který bude provádět daný postup automaticky. Při jeho tvorbě budou také popsána problematická místa.

2 GIS A DOPRAVNÍ MODELOVÁNÍ

Je určitým paradoxem, že oblast dopravy byla jednou z posledních oblastí, která akceptovala geografické informační systémy jako klíčovou technologii pro podporu svého výzkumu a svých provozních potřeb, přestože doprava patří a vždy patřila mezi základní potřeby lidstva. Uplynula téměř tři desetiletí od těchto ztracených příležitostí pro vzájemné obohacení. GIS se od té doby vyvinuly a vyzrály z jakéhosi nástroje do podoby technologie a dokonce se staly legitimní oblastí vědeckého prostředí známou pod názvem geografická informatika (Goodchild, 1992). Mezitím se problematika dopravy ale i GIS samy vzdálily od svých historických kořenů v geografických a prostorových vědách a staly ve větší míře multidisciplinárními obory, odrážející společně realitu dopravních cest a toků a pohybů cestujících a nákladů, které mají mnoho tváří (Gutierrez et al., 1999).

Kartografie a GIS se v této oblasti v průběhu posledních sto let výrazně proměnily a stále proměňují. Zásadní roli v této proměně sehrál vývoj výpočetní techniky a tak i možnosti zapojení geoinformačních systémů do oblasti dopravní telematiky, navigačních systémů a dalších dopravně-informačních kanálů. Kartografie tak začala být nucena pracovat s jiným typem dat (místo analogových s digitálními) a upravit i metody práce (Žáková, 2011) datové modely a databáze, do kterých byly tyto modely ukládány.

2.1 Datové dopravní modely v GIS

GIS je prostorovou reprezentací nebo modelem dat používaných pro vyobrazení určité části zemského povrchu (Frank, 1992). V dopravních souvislostech se uvažují tři třídy modelů GIS (Goodchild, 1992b):

- Polní modely nebo reprezentace spojitě změny nějakého jevu v prostoru. Tento model se používá z hlediska vertikální projekce terénu.
- Diskrétní modely, podle kterých diskrétní subjekty (body, přímky nebo mnohoúhelníky) obsazují prostor. Odpočívadla při dálnicích, prostory pro výběr mýtného a urbanizované oblasti mohou využívat tento model.
- **Síťové modely** pro reprezentaci topologicky spojených lineárních subjektů (jako jsou **silnice**, železniční tratě nebo aerolinie), které jsou spojeny v nějakém spojitém referenčním povrchu.

Zatímco všechny tři modely mohou být užitečné pro dopravu, síťový model vybudovaný kolem koncepce oblouku (hrany - edge, nebo úseku a jeho částí - segmentů) a uzlu (node) hraje nejdůležitější úlohu v této aplikační oblasti, neboť síťová infrastruktura pro jeden či více druhů dopravy je velmi důležitá při umožňování a podpoře osobní a nákladní dopravy (Daunoras et al., 2008). Ve skutečnosti mnoho dopravních aplikací pouze vyžaduje určitý síťový model pro reprezentaci svých dat. Příklady takových aplikací zahrnují:

- **povrchy vozovek** a další systémy pro řízení možností,
- směrovací procedury pracující v reálném čase a offline způsobem, včetně vysílání záchranných vozidel a dopravního přiřazení v čtyřstupňovém plánovacím procesu pro městskou dopravu,
- webové dopravní informační systémy a **nástroje pro plánování cest**,
- **navigační systémy** ve vozidlech, pro **cyklisty** i pro pěší,

- dopravně-telematické systémy,
- řízení dopravních zácp v reálném čase a detekce nehod s využitím různých technologií apod.

Navigační systémy se dnes používají nejenom v individuální dopravě, ale mají podstatně širší využití např. i v dopravě veřejné. Problémem však je, že při svých výpočtech a plánování tras neuvažují některé atributy jízdy, které mají vliv na její výslednou jízdní (cestovní) dobu – travel time. Jedná se mj. právě o morfometrické parametry jako je sklon a křivost daného úseku při plánování a optimalizaci tras a výpočtu cestovního času (Tingsheng, Chuang, 2008).

Ačkoliv je základní síťový datový model již svým zaměřením specifickou odchylkou od konvenčního modelování dat v rámci GIS, nepostačuje pro manipulaci s komplexním zaměřením, které je obsaženo v datech dopravní sítě. Jak bylo zdůrazněno Goodchildem (1998), je třeba určitých rozšíření pro práci s konkrétními datovými strukturami. Goodchild rozlišoval následující dvě základní smysluplná rozšíření (1998):

- Rovinný proti nerovinnému modelu, ve kterém se topologická reprezentace liší od kartografické reprezentace tím, že nevynucuje uzly na kartografických průsečíkových bodech. Nerovinný charakter umožňuje reprezentaci dálničních nadjezdů a též zákazy otáčení atp. Navigační databáze musejí splňovat nerovinný model.
- Odbočovací tabulky obsahují vlastnosti odbočení mezi jakoukoliv dvojicí spojů, které jsou spojeny na síti. Tyto vlastnosti mohou být binární (odbočení povoleno, odbočení zakázáno) nebo se může jednat o měření určitých hodnot (například očekávaná prodleva přes nějakou křižovatku).

Spoje jsou objekty tvořené dopravními pruhy. Struktura umožňující tento objektivě orientovaný pohled na infrastrukturu potřebuje, aby byla zadefinována topologie mezi pruhy. Může provádět ukládání atributů pro jednotlivé pruhy. I s ohledem na tyto parametry by měla být vybírána vhodná datová sada – digitální model silniční sítě tak, aby splňoval tento základní typ datového modelu pro jeho budoucí využití v dopravním modelování a navigačních/dostupnostech modelech a systémech, které pro výpočet cestovního času využívají korektně ohodnocené dopravní cesty - grafy.

2.2 Parametrické ohodnocování grafů

Dopravní modelování nejčastěji při svých analýzách využívá tzv. grafy. Grafy, síťové modely a analýzy jsou širokou matematickou, geoinformační a geometrickou disciplínou, která exaktně zkoumá vlastnosti nastíněných síťových struktur (Horák, Peňáz, Růžička, 2004; cit. v Nový, 2008). Jak už bylo řečeno výše, síť je určitý graf, který se skládá ze spousty hran a uzlů (Peňáz, 2006). Pro reálný svět je samozřejmostí existence velkého množství nejrůznějších síťových struktur. Některé z nich mají přírodní charakter, jiné vznikly a existují v důsledku činnosti člověka. Jako příklady lze uvést síť **silniční**, železniční, produktovodní či síť hydrologické (Peňáz, 2006).

Pojem „graf“ je všeobecně znám z matematiky, kde se používá jako nejčastější grafické znázornění funkční závislosti. Grafem v teorii grafů se rozumí objekty popsané množinou vrcholů a množinou hran (Šeda, 2003). Graf se skládá z vrcholů neboli uzlů (angl. vertices, resp. nodes) a hran (angl. edges), přičemž hrana vždy spojuje dva vrcholy. Pokud vrchol není spojen s žádnou hranou, nazývá se izolovaným, v případě že je spojen právě s jednou hranou, jedná se o koncový vrchol.

Narozdíl od uzlů hrana může být také orientována, v tom případě se rozlišuje její počáteční (angl. start point) a koncový bod (angl. end point; Sladký, 2007). Graf může být označen za orientovaný v případě, že všechny jeho hrany jsou orientované (Tab. 1). V teoreticky zaměřené literatuře se lze setkat i s pojmy prázdný graf (nemá žádné vrcholy, tudíž ani hrany) a nekonečný graf (má nekonečně mnoho vrcholů). Značně specifický případ rovněž nastává, když počáteční a koncový bod hrany jsou totožné – v tomto případě se hovoří o smyčce v grafu.

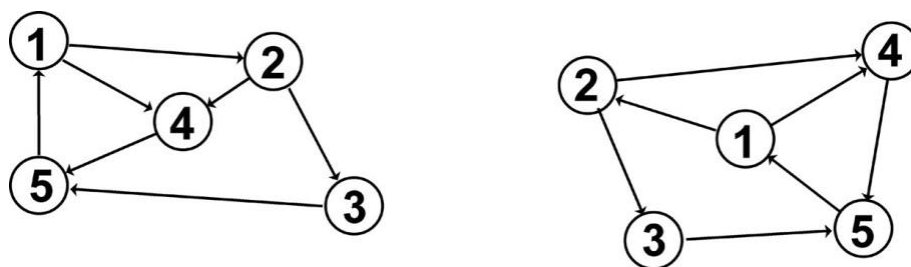
Graf $G = (V, E)$ je tedy možné definovat jako uspořádanou dvojici množin V a E , kde V je konečná, neprázdná množina vrcholů grafu a E je množina hran (u, v) grafu G , přičemž $u, v \in V$. V některých případech není orientace hran podstatná, tj. není potřeba rozlišovat počáteční a koncové vrcholy hran. V takových případech se užívá pojem neorientovaný graf. Neorientovaný graf je trojice $G = (V, E, \varepsilon)$. Poslední možností je graf smíšený, skládající se z jak orientovaných tak i neorientovaných hran (Šeda, 2003).

Druh grafu	Definice
Orientovaný	Obsahuje pouze orientované hrany.
Neorientovaný	Obsahuje pouze neorientované hrany.
Smíšený	Obsahuje orientované i neorientované hrany.

Tab. 1. Základní členění síťových grafů (Zdroj: Tázlar, 2012 + úpravy autora)

Jako příklady případů, které je možno modelovat pomocí smíšených grafů lze uvést právě i dopravní síť (železniční, silniční,...), kde vrchol reprezentuje např. křižovatku, nádraží, výhybku, atd. a hrana reprezentuje silnici, úsek tratí, jednotlivou kolej, atd. Silniční dopravní síť může být proto abstrahována jako graf v topologickém smyslu, skládající se z vrcholů a hran, které se ještě skládají z jednotlivých segmentů (Taaffe et al., 1996; Gabriel a Vaclav, 1996; Wheeler a O'Kelly, 1999; cit. v Li, Shum, 2001).

Pro většinu síťových modelů je však prakticky nezbytné ohodnotit jednotlivé hrany. Nejčastěji jsou přiřazeny jisté kvantifikátory (reálná čísla), které reprezentují odpovídající náklady na překonání prvku sítě, vhodnost použití dle zvoleného číselníku, skutečnou délku, čas, aktuální rychlost (velikost pohybového vektoru) atd. V této práci bude potřeba do tohoto číselníku zakomponovat také morfometrické charakteristiky terénu, které budou výsledný pohybový vektor modelovat i v závislosti na aktuální rychlosti. Tímto způsobem vznikne hranově ohodnocený graf, který může (a bude) být zároveň i orientovaný viz Obr. 1. V případě jeho orientace pak může jedna tatáž hrana nabývat hodnot ve i proti směru její orientace.



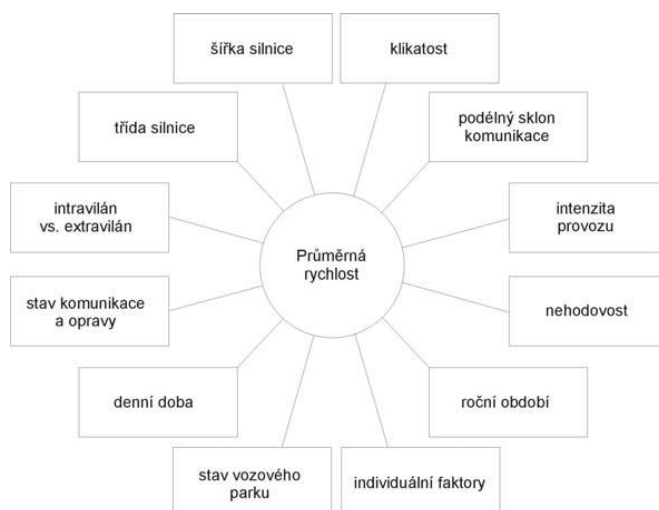
Obr. 1. Ohodnocený orientovaný graf (Zdroj: Bartoš, 2012)

Odpor proti velikosti pohybového vektoru po daných hranách zajišťuje tabulka impedance, kam se tyto hodnoty vkládají. Ve složitějších grafech často nestačí znalost ohodnocení a orientace hran, ale je potřeba zahrnout případné bariéry nebo možnosti přechodu mezi určitými hranami. Tato situace je ošetřena použitím odbočovacích tabulek - matic nebo relací, v nichž je poznamenána možnost přechodu mezi jednotlivými hranami, tzv. incidence (Horák, 2002). To znamená*, že potenciálně může pro jednu hranu existovat daleko více nežli jen dvě hodnoty.

Typickým příkladem odbočovací relace jsou manévry. Ty obsahují informaci o zákazu odbočení (otáčení) na křižovatce vyplývající z dopravního značení. Díky těmto informacím potom probíhá navigace po síti komunikací podle reálných omezení a poskytuje uživateli přesné pokyny a výběr trasy. Příkladem odbočovací matice je zase zákaz vjezdu, který omezuje vjezd/průchod různých typů dopravních prostředků, cyklistů a pěších. A to buď v jednom, nebo v obou směrech. Tyto parametry je také velmi vhodné zohlednit do pohybu po síti pozemních komunikací.

Dalším faktorem, který může měnit základní kvantifikátory ohodnocení grafu, je restrikce. Klasickým příkladem restrikce z oblasti dopravního modelování je maximální povolená rychlost, ta však s ohledem na zaměření práce nebyla určujícím parametrem, více v kapitole 2.4.

Studiem ohodnocování vektorové sítě a plánování tras po grafu ve vztahu k digitálnímu modelu reliéfu a pohybovému vektoru se v minulosti zabývalo několik prací. Ze všech možných parametrů ovlivňujících ohodnocení síťového grafu, které uvádí např. Hudeček (2009) na Obr. 2 níže, byla většinou průměrná rychlost počítána pouze na základě délky úseku a ohodnocení dle základních nemorfometrických charakteristik.



Obr. 2. Parametry ovlivňující ohodnocení síťového grafu (Zdroj: Hudeček, 2009)

S ohledem na cíl této práce by důraz měl být kladen na parametry morfometrické, jelikož jedním z cílů bude nalézt vztah mezi digitálním modelem reliéfu (dále jen DMR) a síťovými analýzami. Pro ohodnocení je důležité na základě rešerše vhodně vybrat a definovat ty parametry terénu, které mají na rychlost největší vliv, a současně s nimi lze pracovat v prostředí GIS.

2.3 Morfometrické parametry

Morfometrické a následně strukturní vlastnosti reliéfu jsou určeny jejich derivacemi nadmořské výšky. Definování matematických derivací výšky v jakémkoli bodě reliéfu vychází z předpokladu, že digitalizovaný povrch lze považovat za matematicky spojitý (Voženílek, 2001). Dle Krcha (1990) je vymezeno 5 základních morfometrických charakteristik reliéfu (terénu), a to výška, sklon, orientace, horizontální a vertikální křivost. Jejich výpočet je možný pro grid i TIN, nejčastěji se však používá v souvislosti s **gridem**.

Každý parametr nabývá v libovolném bodě georeliéfu určitou velikost, která se pohybuje v určitém intervalu. Sklon a křivost hrají jistou roli při stanovení průměrné rychlosti na silnicích (Voženílek, 2001), a proto je důležité pro potřeby další práce tyto parametry vysvětlit. Další parametry jako nadmožská výška a orientace svahů nemají takový vliv na průměrnou rychlost, a proto není třeba je dále zmiňovat.

Pro tuto práci budou zapotřebí odvozené morfometrické charakteristiky výšky vyjadřující změnu reliéfu v prvním i druhém řádu ve směru komunikace (grafu):

- **sklon,**
- **vertikální křivost.**

2.3.1 Sklon

Hlavním parametrem pro určení vztahu mezi reliéfem a síťovými analýzami je podélný sklon komunikace. Ten je považován za základní morfometrickou charakteristiku, která určuje intenzitu gravitačně podmíněných (geomorfologických, geologických, hydrologických,...) procesů (Mowen et al., 2004). Sklon plochy je úhel sevřený terénní čarou nebo dílčí plochou terénního reliéfu s vodorovnou rovinou (Smolová, Vítek, 2007). Udává se ve stupních, radiánech nebo procentech.

Dle normy ČSN 73 61 01 je výškové řešení trasy silniční komunikace dáno souborem výškových návrhových prvků, stanovených k zachování jednotnosti a zákonitosti ve výškovém vedení trasy. Součástí výškových návrhových prvků jsou sklony, které charakterizují geometrický tvar nivelety (průmět trasy komunikace do svislé roviny proložené trasou komunikace). U komunikací rozlišujeme podélný a příčný sklon:

Podélný sklon

Podélný sklon nivelety je její místní odklon od vodorovné roviny (ČSN 73 61 01). Podélný sklon se obvykle označuje s a jeho hodnota se udává v procentech. Ve směru nárůstu staničení¹ trasy se rozeznává (ČSN 73 61 01):

- stoupání, označené znaménkem + (plus) před číselnou hodnotou,
- klesání, označené znaménkem – (minus),
- vodorovná plocha, označená symbolem ± 0 %.

Úseky komunikací (grafu) jsou od sebe odlišeny v tzv. stacionárních bodech, kde $s = 0$ (první derivace nadmožské výšky je rovna nule). Při přechodu z úseku s kladnou hodnotou sklonu do hodnoty záporné se jedná o globální/lokální maximum. V opačném případě jde o tzv. globální/lokální minima

Hodnota navrženého podélného sklonu nivelety závisí především na členitosti území a na návrhové rychlosti především u automobilové dopravy. Minimální hodnota podélného sklonu není normou ČSN 73 61 01 stanovena. Z praktického hlediska se doporučuje navrhovat minimální podélný sklon kolem hodnoty 0,5 %, vzhledem k odvodnění povrchu vozovky (ČSN 73 61 01).

¹ Provozní staničení silniční nebo dálniční komunikace se odvozuje z délek úseků uzlového lokalizačního systému na dané komunikaci načítáním těchto délek ve směru orientace uzlového lokalizačního systému od hodnoty 0,000 km na začátku komunikace až po hodnotu odpovídající konci komunikace (ŘSD, 2013).

Oproti příčnému sklonu komunikace, který hraje roli zejména v odtokových poměrech, ovlivňuje podélný sklon komunikace možnou (maximální, bezpečnou i průměrnou) rychlost na silnici (Hudeček, 2011).

V geomorfologii se pak setkáváme s pojmem úpatí, které Demek (1988) definuje jako pás terénu na styku dvou různě skloněných ploch na rozhraní mezi vyšším a nižším územím. Čára při úpatí, která pak tyto místa spojuje, se nazývá úpatnice. Tyto pojmy poté budou důležité v další části práce při hledání kritických bodů na silniční síti.

Příčný sklon

Příčný sklon je odklon povrchové přímky silniční komunikace od vodorovné roviny v určitém příčném řezu. Příčný sklon obvykle označujeme p a jeho hodnotu udáváme rovněž v procentech (Hudeček, 2009). Příčný sklon komunikace však nemá takový vliv na průměrnou rychlost, a tak nebude v této práci uvažován, resp. bude implicitně nastaven na hodnotu 0.

2.3.2 Křivost

Stejně jako u výpočtu sklonu je i křivost jedním ze základních parametrů každého digitálního model terénu (DMR). Křivost vyjadřuje změnu sklonu (zakřivení terénu ve směru spádnice) nebo zakřivení vrstevnic².

Křivost reliéfu je vypočítána jako druhá derivace nadmořské výšky. Pokud výstupní DMR vykazuje pozitivní křivost, jedná se o geomorfologicky konvexní tvar v dané buňce (Mowen et al., 2004). V opačném případě, kdy křivost je negativní, se jedná o konkávní tvar. Plochému povrchu je přiřazena nulová hodnota.

Základní parametry pro morfometrické analýzy povrchu uvedené v Krcho (1990) jsou křivosti:

- normálová (vertikální, K_v):
 - vertikální křivost je definována jako míra změny sklonu a má vliv na zrychlení či zpomalení automobilu, tedy i na průměrnou rychlost na daném segmentu (Voženílek, 2001). Vertikální křivost určuje, jak prudké bude stoupání či klesání.
- horizontální (K_h):
 - horizontální křivost udává míru změny orientace, která ovlivňuje konvergenci a divergenci pozemní komunikace. Vzhledem k zařezání komunikací do terénu nemá však horizontální křivost na tvar silnice téměř žádný vliv (Voženílek, 2001). Používá se v dopravním stavitelství při stanovování přechodnic³.

Pro lepší ilustraci tohoto parametru na povrchu georeliéfu je možné ji považovat jako funkci dvou proměnných:

$$f = f(x, y)$$

Dále je nutno zavést pro demonstraci výpočtu následující označení pro první a druhé derivace podle x a y a ještě derivaci smíšenou. První derivace jsou opětovně označeny:

$$f_x = \frac{\partial f}{\partial x}, \quad f_y = \frac{\partial f}{\partial y}$$

² V obou případech se jedná o speciální případy normálových křivostí – normálová křivost ve směru tečny ke spádnici a normálová křivost ve směru tečny k vrstevnici. Více v Krcho (1990).

³ Přechodnice je křivka spojující dva úseky trasy s odlišnou křivostí, nejčastěji na nájezdu do oblouku (železnice) či zatáčky (silnice) a na výjezdu z něho (VUT, 2012).

Gradient (diferenciál, rozdíl) funkce $f = f(x, y)$ je definovaný v každém bodě A (x, y), má směr normály k vrstevnici a je orientovaný ve směru růstu funkce f . Jeho souřadnice jsou parciální derivace f_x a f_y v bodě A (x, y):

$$\text{grad}(A) = f(x, y) = (f_x, f_y)$$

Křivost normálového řezu ve směru tečny ke každé křivce je dána vztahem (Krcho, 1990):

$$K_n = \frac{f_{xx} + 2 \cdot f_{xx}m + f_{yy}m^2}{1 + f_x^2 + 2 \cdot f_x f_y m + (1 + f_y^2)m^2},$$

přítom $m = \frac{f_x}{f_y} = \text{tg } \alpha$, kde α je parametr, který se mění podle velikosti směru normálového řezu.

Pokud parametr m nahradíme n , bude mít ve směru tečny k vrstevnici hodnotu:

$$n = t = - \frac{f_x}{f_y}$$

Obecný vztah pro výpočet křivosti podle Krcha (1990) je ve vztahu:

$$K = \frac{1}{\sqrt{1 + f_x^2 + f_y^2}} \frac{f_{xx} + f_x^2 + 2 \cdot f_{xy}f_x f_y + f_{yy}f_y^2}{(1 + f_x^2)f_x^2 + 2 \cdot f_x^2 f_y^2 + (1 + f_y^2)f_y^2}$$

Jmenovatel:

$$1 + f_x^2 + 2 \cdot f_x f_y m + (1 + f_y^2)m^2$$

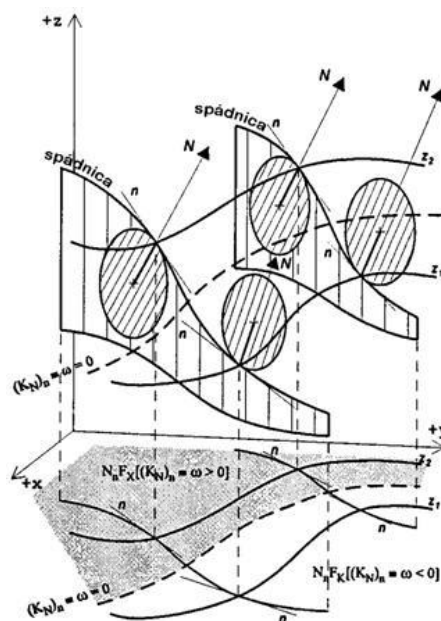
Je možné nahradit tímto výrazem:

$$(1 + f_x^2)f_x^2 + 2 \cdot f_x^2 f_y^2 + (1 + f_y^2)f_y^2$$

Díky tomu je získán výsledný tvar rovnice pro normálovou křivost (K):

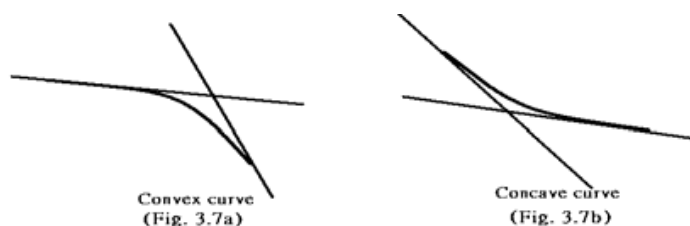
$$K = \frac{f_{xx} + f_x^2 + 2 \cdot f_{xy}f_x f_y + f_{yy}f_y^2}{(1 + f_x^2)f_x^2 + 2 \cdot f_x^2 f_y^2 + (1 + f_y^2)f_y^2}$$

Zjednodušeně je možné říci, že normálovou křivostí se rozumí křivost normálového řezu bodu A (x, y) jako průsečnici plochy s rovinou obsahující normálu N k topografické ploše a tečny n ke spádnicí, tak že rovina řezu je kolmá na tečnou rovinu k topografické ploše v daném bodě A (x, y), jak ukazují i Obr. 3.



Obr. 3. Normálová křivost povrchu (Zdroj: Krcho, 1990)

Vertikální tvar je možné rozdělit na dva druhy (Obr. 4 níže), které postupným nárůstem a klesáním z jeho svahu vytvoří konvexní křivku (území s vysokou kladnou hodnotou křivosti). Snížení a pak postupné zvyšování tvoří konkávní tvar křivky (území s vysokou zápornou hodnotou křivosti), Tingsheng W., Chuang S.W (2008).



Obr. 4. Konvexní a konkávní tvar segmentu silniční sítě (Zdroj: Tingsheng W., Chuang S.W, 2008)

Právě s pomocí hodnoty normálové křivosti je tak možné charakterizovat jednotlivé morfometrické formy georeliéfu. Tyto formy jsou od sebe odděleny inflexními body, kde $K = 0$ (druhá derivace nadmořské výšky je rovna nule). Pokud je $K > 0$, pak forma je vypouklá – jedná se vrchol nebo hřbet pokud $K < 0$, tak je forma vydutá – jedná se o údolí (Tab. 2).

Dle Demka (1988) je základní členění tvarů reliéfu podle křivosti následující:

Vypuklé – konvexní – tvary pevninského reliéfu	
Pahorek	vypuklý tvar malých rozměrů s málo výrazným úpatím a s mírnými svahy. Je charakteristickým tvarem pahorkatin s relativní výškou do 150 m
Kupa	ploše zaoblená vyvýšenina (pahorek, kopec, hora, vrch) s půdorysem kruhovým, eliptickým nebo i mírně nepravidelným
Kužel	vyvýšenina podobající se geometrickému kuželi. Vrchol bývá ostrý nebo jen s malou plošinou na vrcholu
Hora	výrazná vyvýšenina v okolním reliéfu, často osamocená, kupovitého, kuželovitého, nebo tabulovitého tvaru, někdy ve formě krátkého, výrazného hřbetu s relativní výškou 300 – 600 m, s výraznými sklonů svahů, výrazným úpatím a poměrně malou základnou vzhledem k relativní výšce
Vrch	vypuklý tvar reliéfu větších rozměrů a zpravidla s relativní výškou 150 – 300 m
Velehora	mohutná vyvýšenina (hora) s velkou relativní výškou a širokou základnou ve velehornatině
Štít	vrchol velehory tvořený skalními stěnami a skalními útvary
Hřbet	protáhlá vyvýšenina, jejíž délka přesahuje šířku s různě ukloněnými svahy a plochou zaoblenou vrcholovou částí
Hřeben	protáhlá vyvýšenina, jejíž délka značně přesahuje šířku a která má často skalnatou vrcholovou část
Vhloubené – konkávní – tvary pevninského reliéfu	
Kotlina	výrazná vhloubená sníženina obklopená na všech stranách vyšším reliéfem, její dno je ploché nebo mírně zvlněné
Brázda	výrazná, poměrně úzká sníženina protáhlého tvaru s plochým dnem, omezená často na všech stranách vyšším reliéfem
Brána	výrazná protáhlá sníženina spojující sousední vhloubené geomorfologické jednotky většího plošného rozsahu
Úval	výrazná sníženina obvykle protáhlého tvaru, na jednom nebo na obou koncích otevřená, má široké dno s převládající výškovou členitostí do 75 m
Ploché tvary pevninského reliéfu	
Plošina	plochý nebo mírně zvlněný povrch, vyznačující se převládající malou výškovou členitostí do 30 m
Planina	plošina ve větší nadmořské výšce, zpravidla v oblasti vrchovin a hornatin

Tab. 2. Přehled základních geomorfologických tvarů (Zdroj: Demek, 1988 v Žallmanová, 2005)

Definice těchto útvarů je velmi důležitá pro finální hodnocení výsledků, kde bude s těmito pojmy pracováno a na základě nich i určována velikost křivosti.

2.3.3 Fyzikální podstata

Tyto parametry nabývají na významu v módech dopravy, které jsou jimi nejvíce ovlivněny. Jak již bylo řečeno výše, jedná se především o cyklo dopravu a dopravu nákladní.

U dopravy nákladní je to především dáno vlivem velkého valivého odporu a hmotnosti nákladu. Tento vztah popisuje i následující rovnice:

$$O_{\mu} = \mu \cdot G \quad [N],$$

kde G je tíha vozidla s nákladem [N] a μ součinitel valivého tření [-].

U cyklistické dopravy dochází k největšímu vlivu odporů na výsledný pohybový vektor díky vnějším faktorům, díky setrvačnosti (prvnímu Newtonovu zákonu) a naopak díky malému vlivu vnitřních faktorů jako je tažná síla F_t , která je v porovnání s motorizovanou dopravou několiknásobně nižší.

Aby bylo těleso uvedeno do pohybu, její velikost musí být vyšší než součet následujících faktorů:

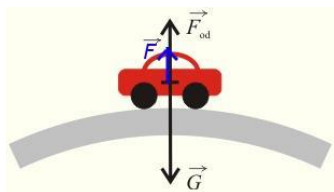
$$F_t \geq F_o \geq \sum O = O_\mu + O_w + O_s + O_j + O_t$$

- O_μ - **odpor valivý** (definován výše),
- O_w - odpor vnější - prostředí (vzduchu)⁴,
- O_s - **odpor ze sklonu silnice** (viz níže),
- O_j - odpor setrvačných sil⁵,
- O_t - odpor vnitřní.

Většina těchto vlivů však v práci uvažována býti nemůže z důvodů nemožnosti jejího přesného určení, proměnlivosti či malému vlivu na výsledný pohybový vektor.

Odpor morfometrie terénu

Jestliže na těleso nepůsobí žádná tažná nebo vnější síly, je výslednice sil nulová, pak těleso setrvává v klidu ($F_p = 0$) nebo v rovnoměrném přímočarém pohybu (viz Obr. 5).



Obr. 5. Vliv sil působících na těleso v klidu (Zdroj: Reichl, 2013)

V řadě praktických situací na dopravní síti se však setkáváme s aplikací nakloněné roviny, a proto je nutné správně popsat síly, které na těleso na nakloněné rovině působí. Jestliže na těleso působí síla (tíhová), pak se těleso pohybuje se zrychlením, které je přímo úměrné působící síle a nepřímo úměrné hmotnosti tělesa: $F_p = m \cdot a$.

Dostáváme tedy vztah: $m \cdot g \cdot \sin \alpha = m \cdot a$, odkud je možné s využitím matematické podoby druhého Newtonova zákona vyjádřit velikost zrychlení ve tvaru $a = g \cdot \sin \alpha$. I v tomto ohledu je tedy vidět nesporný vliv sklonu jakožto morfometrického parametru terénu na výslednou pohybovou sílu (vektor) a zrychlení – tedy i rychlosti (zrychlení je první derivací rychlosti), tj. parametru využitelného v síťových analýzách.

Uvažujme nakloněnou rovinu svírající s vodorovnou rovinou α (podélný sklon komunikace) umístěnou v homogenním tíhovém poli. Na těleso na této nakloněné rovině tedy působí tíhová síla F_g .

⁴ $O_w = C_x \cdot \frac{\rho}{2 \cdot 9,81} F \cdot v_r^2$ [N], kde C_x je odporový součinitel tvaru plochy vozidla [-], ρ – hustota vzduchu (1,25) [kg/m³, F - čelní plocha dopravního prostředku [m²], v_r - relativní rychlost vzduchu [m/s]. (Zdroj: Reichl2013)

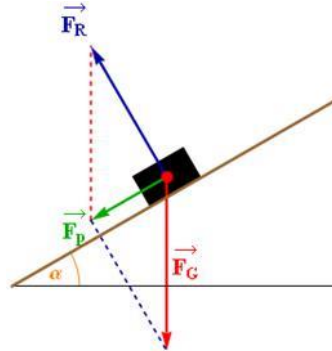
⁵ $O_j = G \cdot j \cdot \delta$ [N], kde j je relativní zrychlení pohybu dopravního prostředku [-] a δ - opravní (účinný) součinitel [-]

Odpor ze stoupání

$$O_s = \pm F_g (G) \cdot \sin \alpha \quad [\text{N}]$$

kde $\sin \alpha \approx \text{tg} \alpha = s \quad [-]$, $s = \frac{s \%}{100} \quad [-]$

Na totéž těleso působí i reakční síla F_r nakloněné roviny (viz Obr. 6). Tato síla je kolmá na nakloněnou rovinu. Výsledná pohybová síla F_p je tak dána především směrem a velikostí morfometrických parametrů (především sklonu).



Obr. 6. Síly působící na těleso na nakloněné rovině (Zdroj: Reichl, 2013)

Zároveň je třeba nutně uvažovat **třecí síly** $F_{tř}$ v podobě zapojení možnosti vlivu „drsnosti“ typu povrchu - součinitele smykového tření⁶), jak na straně zemského, tak na straně dopravního prostředku, odporové síly vzduchu a síly (tažné nebo trakční), kterou vydává zdroj samotného tělesa (motor, cyklista,...). Výslednicí tíhové síly a reakční síly je síla F_p způsobující pohyb tělesa. Její směr je rovnoběžný s nakloněnou rovinou v případě nezapojení síly tažné. Platí tedy vztah:

$$F_p = F_g + F_r + F_{tř}$$

Pro vybrané parametry je nutné předem definovat a stanovit míru jejich vlivu na pohyb po síti a zhodnotit reálnost jejich zapojení do metodiky tvorby korektně ohodnocené datové sady.

Dle vzorce: $a = g \cdot \sin \alpha$ lze postupovat, pokud bychom počítali aktuální rychlost v daném bodě a zemský povrch by byl nakloněná rovina. Cílem práce však je ohodnocovat celé úseky komunikací průměrnou hodnotou. Jelikož zemský povrch rovinou není, dochází ke změnám všech jeho morfometrických parametrů a tím i hodnot zrychlení a rychlosti, je nutné tyto hodnoty co nejpřesněji modelovat za pomoci všech vlivů, které jsou reálně implementovatelné do prostředí GIS pro vektorovou silniční síť - graf.

Snížení rychlosti vlivem tření

Rozklad tíhové síly na dvě navzájem kolmé složky je užitečný zejména v případě, kdy by byla uvažována také síla smykového tření $F_{tř}$, která působí mezi tělesem na nakloněné rovině a touto nakloněnou rovinou. Třecí síla působí vždy proti směru pohybu tělesa a leží ve styčných plochách obou těles. Jedním z těles je povrch země (reliéf, terén). Tento faktor reliéfu je velmi důležitou složkou při modelování pohybového vektoru právě v cyklistické dopravě, který není možné vynechat díky velmi různorodému prostředí, které přináší jak městská zástavba, tak volná krajina extravilánu, kterou mohou cyklisté využívat. Nelze opomenout evidentní rozdíl

⁶ Součinitel smykového tření je fyzikální veličina, která udává poměr třecí síly a kolmé tlakové síly mezi tělesy při smykovém tření. Hodnoty součinitele smykového tření závisí na konkrétní dvojici látek na povrchu a drsnosti těles, mezi nimiž smykové tření probíhá. (Zdroj: Reichl, 2013)

např. mezi asfaltovou komunikací či silnicí ze žulových kostek nebo nezpevněnou polní či lesní cestou. Tento parametr lze částečně redukovat použitím optimálního jízdního kola (silniční, trekkové nebo horské) – tedy velikosti druhé třecí plochy, ale vzhledem k diskutované variabilitě povrchů ve sledovaném území, je tato volba samozřejmě složitější a zároveň i mimo výzkumné cíle této práce. Zároveň také se snižující se velikostí třecí plochy tělesa na zemském povrchu (pneumatik jízdního kola) ubývá možnost využívat plochy s větším součinitelem smykového tření⁷.

Vliv nerovnosti a aktuálního stavu vozovky (terénu) na průměrnou rychlost je také zřejmý. Předpoklad odpovídajícího stavu u jednotlivých typů silnic umožňuje tento faktor zahrnout obecně mezi jednotlivé typy komunikací. Ovšem aktuální stav komunikací je velice individuální a pravidelně dochází ke zhoršení především po zimních měsících. Údaje o typu povrchu a jeho stavu jsou navíc dostupné za celou ČR v některých datových sadách cestní sítě (viz kapitola 3.2).

Vzhledem k možnostem systémů GIS, naplněnosti datových sad, charakteru některých faktorů a účelem práce bude cílem z fyzikálního hlediska především co nejpřesněji popsat a modelovat vliv **odporu ze sklonu**, včetně jeho změn (křivosti), silnice na výsledný pohybový vektor (velikost pohybové síly) a korektně jeho vliv ohodnotit pro model silniční sítě využívaný v navigačních, dostupnostních a dopravních systémech.

2.3.4 Klasifikování segmentů podle křivosti a sklonu

Většina autorů ze sféry geomorfologie (Demek, 1998; Krcho, 1990) považuje oblasti na konvexních formách ve směru spádnic za oblasti, kde probíhá zrychlování hybných procesů hydrologických i sesuvných. V oblasti dopravy je pak teoreticky možné tyto procesy vztáhnout a rozdělit na procesy akcelerační probíhající na těchto místech, zatímco na konkávních formách na pohyb decelerační. Právě pro tyto procesy je také důležitá hodnota sklonu svahu s . Narozdíl od geomorfologických a hydrologických procesů, které povětšinou probíhají ve směru sklonu záporného (z kopce), nepotřebují tak odlišovat oba potenciální směry, u cyklo dopravy a potažmo modelování velikosti pohybového vektoru dochází k působení sil i proti síle gravitační, tj. je zde nutné zapojit do těchto úvah také velikost sklonu nejen v absolutní hodnotě, ale a to především v jeho celkové orientaci.

Hodnoty křivosti, které jsme výše popsali, jsou základem pro vymezení geometrických forem georeliéfu, které mají vliv na pohyb cyklisty. Na základě normálové křivosti je možné vyjádřit geometrické tvary v libovolném bodě $A(x, y)$. Klasifikaci je možné provést na základě předpokladů akceptace základních fyzikálních zákonů a podle znamének křivosti a sklonů do čtyř následujících skupin:

- $(s > 0 \cap K > 0)$ – akcelerační procesy, zvyšování velikost pohybového vektoru F_p - vysoká rychlost,
- $(s < 0 \cap K > 0)$ – výrazné akcelerační procesy, výrazné zvyšování velikosti pohybového vektoru F_p – velmi vysoká rychlost,

⁷ Velikost třecí síly lze psát v obecném tvaru: $F_t = f \cdot F_n$, kde f je součinitel smykového tření mezi tělesem a nakloněnou rovinou (povrchem). S využitím vztahu: $F_n = F_G \cdot \cos \alpha$ pak můžeme velikost třecí síly působící na těleso na nakloněné rovině psát ve tvaru: $F_t = F_G \cdot f \cdot \cos \alpha$. (Zdroj: Reichl, 2013)

- ($s < 0 \cap K < 0$) – výrazné decelerační procesy, výrazné snižování velikost pohybového vektoru F_p – velmi nízká rychlost,
- ($s > 0 \cap K < 0$) -- decelerační procesy, snižování velikost pohybového vektoru F_p – nízká rychlost.

Tyto základní čtyři formy reliéfu jsou typické hlavně pro přírodní formy. Lineární formy ($K = 0 \cup s = 0$) se na povrchu prakticky nevyskytují. V některých případech se vyskytují, ale hodnoty K nebo s se vždy limitně blíží nule.

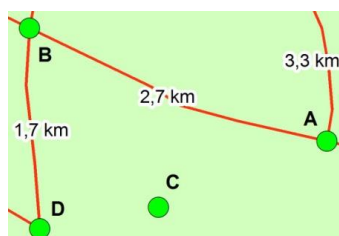
Typickým příkladem výše uvedených 4 forem reliéfu je právě silniční síť.

2.3.5 Rešerše metodik výpočtu morf. charakteristik

K porovnání použitých metodik při hledání vztahu mezi DMR a síťovými analýzami by mohly sloužit některé evropské modely dostupnosti. Zabývá se jimi celá řada výzkumů realizovaných na akademické půdě i v praxi, většinou však se tyto práce zabývají modelováním pohybu pomocí motorizovaných vozidel.

Modely dostupnosti

Podle J. Brinkeho (1999) platí, že akcesibilita (dostupnost) dopravního uzlu roste s jeho rostoucím spojením. Čím větší je počet přímých spojení k danému místu (uzlu), tím vyšší je hierarchický řád uzlu a jeho dopravní dostupnost (Kusendová, 1996). Nejvyšší dostupností tak disponuje uzel B (Tab. 3). Pokud z nějakého vrcholu ani do něj nevede žádná hrana, nazývá se takový vrchol izolovaným vrcholem (uzel C, Obr. 7; Beránek, 2008).



Obr. 7. Zjednodušená dopravní síť se čtyřmi uzly A-D s jejich vzdáleností

Uzel	A	B	C	D	Hierarchický řád uzlu
A	0	1	0	0	1
B	1	0	0	1	2
C	0	0	0	0	0
D	0	1	0	0	1

Tab. 3. Počet přímých spojení mezi dopravními uzly v dopravní síti.

Zdroje: Kufner (2010)

Avšak pouhý cíl, popsání, jak jednotlivé uzly v síti jsou vzájemně propojeny, jak by tomu bylo u telekomunikační sítě (Wheeler a O'Kelly, 1999; cit. v Li, Shum, 2001) nebo jak dobře je jedno letiště propojeno s jinými letišti (Ivy, 1995; cit. v Li, Shum, 2001) nám stačit nebude. Pro dopravní síť je potřeba začlenit měření vzdálenosti, aby se mohla posoudit dostupnost na všech místech. Na příkladu výstavby NTHS⁸, která primárně ovlivňuje čas potřebný k cestě z jednoho místa na druhé, uvádí Li Shim, že nejde jen o skutečnou fyzickou vzdálenost cesty. Jedině časová vzdálenost je schopna změřit změny v dojezdnosti. Podobný přístup zaujal i Murayama (1994; cit. v Li, Shum, 2001) ve své studii o železničním vývoji v Japonsku, Gutierrez et al. (1996) ve studii o vysokorychlostní železniční síti v Evropě a Gutierrez a Gomez (1999) v práci o M-40, okružní dálnici v Madridu, kde také byla analyzována změna v časové vzdálenosti jako důsledek rozvoje dopravní infrastruktury.

⁸ Síť dálnic a rychlostních komunikací v Číně

Tyto výzkumy jsou v dnešní době nejčastěji řešeny pomocí síťových analýz založených na ohodnoceném síťovém grafu (Bartoš, 2012). Nejčastějším typem výzkumů je analýza dostupnosti časové, kdy je komunikační síť ohodnocena časem nutným k překonání daných linií. Jedním z těchto modelů je model studující budoucí transevropskou silniční síť z roku 1996 (Brainard, 1997). Hodnoty průměrných rychlostí z tohoto výzkumu poukazují na velmi hrubé odhady autorů. Uváděné průměrné rychlosti jsou mnohdy maximální povolenou rychlostí v řadě evropských zemí jako také např. v Spence et al. (1994). Druhým příkladem je výzkum zabývající se dopravní situací ve východní Anglii z roku 1997 (Nutley, 1996). Hodnoty průměrných rychlostí oproti předchozí studii jsou značně odlišné a možno říct i přesnější, i když mezi oběma pracemi je velká měřítková rozdílnost. Příčinu nízkých hodnot průměrných rychlostí v městské oblasti je třeba hledat zejména v intenzitě anglického provozu (Hudeček, 2011).

Tato ohodnocení jsou však většinou založena pouze na jednoduchém vztahu délky dané linie a předem určené průměrné rychlosti pohybu. Velikost pohybového vektoru závisí na mnoha proměnných. Velmi důležitým aspektem v síťových analýzách, tj. při určování časové dostupnosti, výpočtu nejkratších cest a alokaci zdrojů je právě zohlednění dalších aspektů např. i v podobě morfometrických parametrů jako je podélný sklon komunikace a její křivost.

Tyto faktory se však ve většině prací nebraly v potaz. Důvodem je neexistence dostatečně přesné a v užívaných postupech a prostředích snadno použitelné metodiky pro realizaci zohlednění těchto parametrů komunikační sítě při jejím ohodnocování pro potřeby síťových analýz (Suxia et al., 2004). Velmi často se navíc použitelná metoda mění i v závislosti na daném účelu analýzy či na místě, které je zkoumáno. Např. je jasné, že v zemích jako Anglie nebude tento faktor hrát takovou roli jako např. v Rakousku, i proto bylo v tomto ohledu možné pracovat pouze s omezeným množstvím literatury.

Z uvedených studií plyne, že stanovení průměrných rychlostí je velmi subjektivní a liší se autor od autora. Rozdíly jsou dány specifíčností zkoumaného území, převažující důležitostí činitelů, ale také typem výzkumu. Praktická aplikace sklonitosti reliéfu na silniční síť a následná kategorizace jednotlivých úseků silnic podle jejich podélného sklonu je totiž z teoretického hlediska při využití softwarů GIS možná, avšak z praktického hlediska naráží na spoustu problémů, a nutno říci i nepřesností (Hudeček, 2011).

Digitální model silniční sítě Česka se sklony silnic je zmíněn např. v projektu RePUS – Regional Polycentric Urban System - Maier, Mulíček, Sýkora, Drda (2007). Zde byla pro výpočet sklonitosti mj. vypracována extenze softwaru ArcGIS, která však při použití podávala zcela neodpovídající výsledky. Sklony komunikací byly v Česku pro potřeby Ředitelství silnic a dálnic ČR také měřeny a výsledný datový soubor - Uzlový lokalizační systém (dále jen ULS) je k nahlédnutí na Portálu veřejné správy CENIA (2012). Měření probíhala v letech 1996 – 2001 na 18 tis. km silnic I. a II. tříd. ULS však obsahuje jen průměrnou hodnotu sklonu, vypočítanou pouze z rozdílu počátečního a koncového bodu úseku (uzlů) a jeho délky (ŘSD, 2012) dle metodiky ČSN 73 61 01, viz datová sada ULS (kap. 3.2).

Hudeček (2009) pro výpočet průměrného sklonu přiřazoval nadmořskou výšku jednotlivým počátečním a koncovým bodům jednotlivých linií. Na tyto bodové vrstvy byl pomocí operace Extract Values to Points přenesen obsah Z-value atributu z DMR, čímž byla uzlům (počátečnímu a koncovému bodu) přiřazena odpovídající nadmořská výška. Sklon silničních

úseků byl pro oba modely ve sledovaných obdobích vypočítán pomocí následujícího vztahu (Obr. 8):

$$S = \frac{|h_s - h_e|}{l}, \text{ kde}$$

S ... sklon,

h_s ... nadmořská výška startovního bodu úseku,

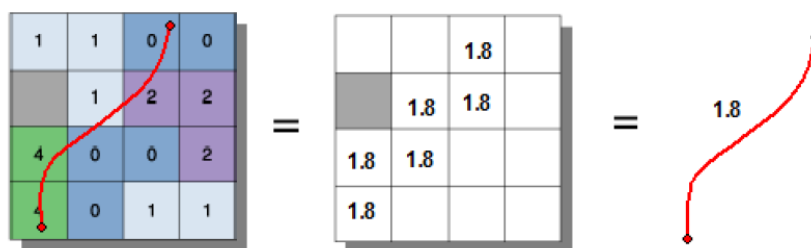
h_e ... nadmořská výška koncového bodu úseku,

l ... délka silničního úseku.

Obr. 8. Výpočet sklonitosti silniční sítě (Zdroj: Hudeček, 2009)

Problém tohoto výpočtu spočívá jednak v tom, že absolutní hodnota nedokáže odlišit hodnotu sklonu pro oba směry pohybu na orientovaném úseku grafu (sítě), tzn. nelze odlišit jízdu do kopce a naopak. Zároveň také tento výpočet neřeší zmiňované lokální maxima/minima na daném úseku, a ten tak celý úsek aproximuje jednou přímkou.

V další práci se Louthan (2010) již se snaží tento model vylepšit použitím výpočtu na základě gridu sklonu, jak ukazuje Obr. 9. Ze všech pixelů, na kterých leží úsek komunikace, byla vypočtena průměrná hodnota.



Obr. 9. Způsob výpočtu podélného sklonu pro úsek silniční sítě (Louthan, 2010)

Tato metodika může teoreticky přinést přesnější výsledky (min. v automobilové dopravě), avšak problematiku oblastí globálních/lokálních minim a maxim či míst se změnou křivosti (stacionárních a inflexních bodů⁹), závislosti na směru orientace sítě a křivosti komunikace také neřeší. Zároveň se jedná pouze o sklon daného pixelu ve směru spádnice¹⁰, který je počítán z nejbližších 8 pixelů, nikoliv ve směru průběhu komunikace. Nevhodnost tohoto postupu dokumentuje případ, kdy linie stoupá (klesá) svahem v jednotlivých ostrých zatáčkách a jednotlivým úsekům je přiřazována hodnota sklonu gridu, která je však v případě klesání nižší (v případě stoupání nižší) nežli skutečný podélný sklon komunikace.

V další práci Tázlara (2012), který již do výpočtu průměrné rychlosti také zařazuje morfometrické vlastnosti, byl sklon opět vypočten na základě odvozených nadmořských výšek počátečního a koncového bodu úseku sítě. V této fázi mohlo dojít k lokálnímu zkreslení, protože použitý zdroj nadmořských výšek (TIN vytvořený z vrstevnic DMÚ 25 s rozlišením 5 m) nedokáže postřehnout všechny detailní terénní prvky, zvláště pak v méně členitém reliéfu. O něco lepší vypovídací hodnotu měla tak spíše východní část území města Olomouce, kde byl již terén členitější. Druhým zdrojem nepřesností zde bylo shledáno z hlediska výpočtu průměrného sklonu opětovné zanedbání případných lokálních konvexních či konkávních jevů

⁹ Bayer (2008) tyto místa souhrnně nazývá tzv. kritické body.

¹⁰ Spádnice je spojnice procházející místy největšího sklonu topografické plochy (Demek 1988 v Žallmannová, 2005).

(stacionární/inflexní body) na cestní síti, protože se počítá jen se zmíněnou výškou počátečního a koncového uzlu. Vzhledem k velmi krátké délce jednotlivých linií (v průměru cca 110 m) a spíše rovinnému charakteru území města však tento jev nebyl shledán významným problémem. Tato metoda však může být problematická při její aplikaci v členitějším terénu či při výskytu delších úseků silniční sítě.

Tato práce se však jako první pokusila nastínit problematiku vlivu směru orientace grafu (silniční sítě) na výpočet výsledných hodnot dojezdnosti, jelikož byla aplikována především pro cyklistickou dopravu, kde rozdíly mezi pohybem po grafu v závislosti na hodnotách sklonu, jsou velké. Jednotlivé hodnoty mající vliv na průměrný sklon byly rozděleny na kladné a záporné ve zvláštních atributech (FT nebo TF) dle směru digitalizace jednotlivých segmentů. Tento proces však byl prováděn manuálně, jelikož směr digitalizace vždy nemusí odpovídat správné hodnotě sklonu (ať už kladné či záporné). Problém by proto poté mohl nastat při samotném ohodnocení zvolené cesty, jelikož by algoritmus nesprávně přiřazoval hodnoty sklonu jen dle směru digitalizace (nikoliv dle reálného sklonu). Problém automatického ohodnocování v závislosti na směru digitalizace linie je velmi důležitý pro vyhledávací (routovací) algoritmy, aby při výpočtu cestovního času přiřazovaly k danému segmentu správnou hodnotu – ať už kladnou v případě, kdy bod počáteční bod leží ve vyšší nadmořské výšce či naopak zápornou, pokud je pohyb ve směru z nižší do vyšší nadmořské výšky.

2.3.6 Určování parametrů v prostředí GIS

Výpočet sklonu je v prostředí GIS většinou možný pouze ve směru spádnice – nejvyšší hodnoty v reliéfu. Výsledná hodnota sklonu s_1 je většinou udávána ve stupních. V silničním hospodářství (dle normy ČSN 73 61 01) a potažmo celé silniční síti se však více využívá sklon s_2 v jednotkách %. Převodní vzorec na procenta je definován následovně:

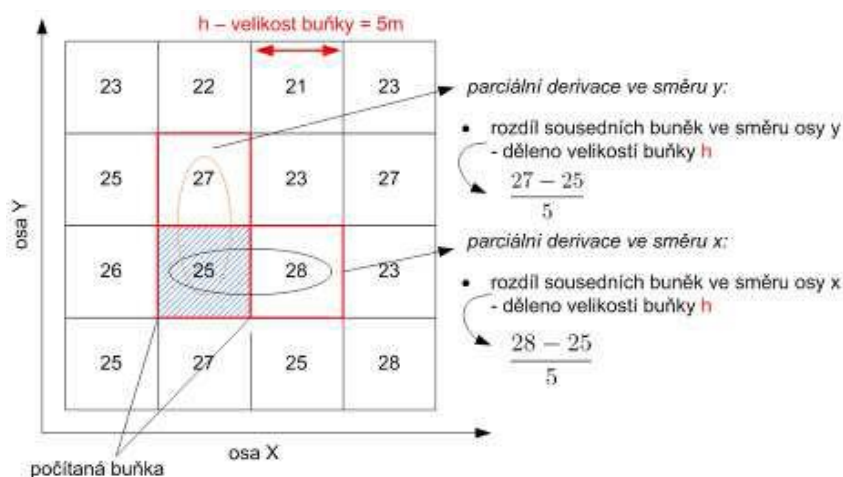
$$s_1 [^\circ] = \tan s_2 [\%]$$

Veškeré následující údaje vztažené k parametru sklon tak budou udávány v jednotkách %.

Pro výpočet v prostředí z nepravidelné trojúhelníkové sítě TIN je informace o sklonu a orientaci dána ze souřadnic bodů definující daný trojúhelník a je možné říci, že tuto informaci obsahují implicitně a není ji nutné počítat. Problém nastává, pokud bychom chtěli z TIN získat morfometrické charakteristiky 2. řádu (tedy právě křivosti). Nástroje dostupné v běžných GIS umožňují výpočet morfometrických charakteristik 2. řádu pouze z rastru. Pro jejich výpočet jsou potřebné 2. parciální derivace ve směru osy x a y, jejichž výpočet na TIN je problematický (Krcho, 1990).

U rastrové reprezentace se sklon i orientace (ale i další morfometrické charakteristiky) počítají pomocí směrových derivací – derivace vyjadřuje velikost změny funkce – a zde hodnotíme velikost změny ve směru spádnice a ve směru vrstevnice. V běžném GIS se hodnoty derivací získají proložením (aproximací) určitého n-okolí buňky polynomem 2. řádu. Nejde tedy o výpočet derivací, ale o jejich aproximaci (hodnota není přesně spočítaná, ale numericky „odhadnuta“).

Velmi zjednodušeně je možné si výpočet derivací představit jako výpočet rozdílu dvou sousedních buněk dělený velikostí buňky (rozlišením rastru). Princip výpočtu derivace je ukázán na Obr. 10 níže.



Obr. 10. Princip výpočtu derivace (Krcho, 1990)

S použitím parciálních derivací můžeme morfometrické charakteristiky prvního řádu (sklon) spočítat pomocí následujících vztahů:

$$\gamma N = \arctan \sqrt{z_x^2 + z_y^2}$$

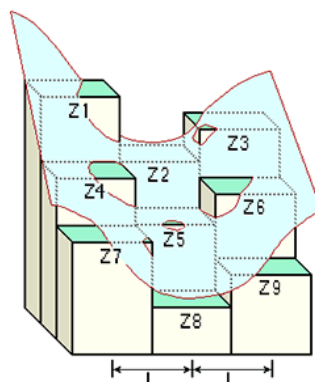
kde: $\frac{\partial z}{\partial x} = z_x$, $\frac{\partial z}{\partial y} = z_y$ jsou první derivace podle x resp. y .

Většina používaných GIS umožňuje i výpočet odvozených morfometrických charakteristik druhého řádu na gridu – jedná se o různé druhy křivosti. Často se tedy setkáme s výpočtem křivosti ve směru spádnice a ve směru vrstevnice, které mohou být nazývány např. profile (vertical) curvature a tangential (horizontal) curvature (GIS GRASS), nebo např. profile curvature a planar curvature (ArcGIS, Kadlčíková, 2007) V ArcGIS je výpočet křivosti dostupný v modulu Curvature v rámci rozšíření 3D Analyst, popřípadě Spatial Analyst.

Výpočet v softwarech (dále jen SW) je však možný pouze pro rastrová data, kde se každému pixelu přiřazuje na základě výpočtu druhých derivací hodnota ze vstupního rastru. Pro každé sousední buňky jsou spočítány hodnoty pomocí proložení polynomu 4. řádu:

$$Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I,$$

kde každý z parametrů je vypočten na základě metodiky nejbližšího souseda ke středovému pixelu. Vztah mezi jednotlivými parametry a všemi 9 pixely nadmořské výšky je pro jednotlivé buňky ilustrován v následujícím diagramu a rovnicích níže:



Obr. 11. Princip výpočtu křivosti v SW ArcGIS (Zdroj: ESRI, 2013)

Výpočet parametrů křivosti pro stanovení rovnice polynomu 4. řádu:

$$A = [(Z1 + Z3 + Z7 + Z9) / 4 - (Z2 + Z4 + Z6 + Z8) / 2 + Z5] / L^4$$

$$B = [(Z1 + Z3 - Z7 - Z9) / 4 - (Z2 - Z8) / 2] / L^3$$

$$C = [(-Z1 + Z3 - Z7 + Z9) / 4 + (Z4 - Z6)] / 2 / L^3$$

$$D = [(Z4 + Z6) / 2 - Z5] / L^2$$

$$E = [(Z2 + Z8) / 2 - Z5] / L^2$$

$$F = (-Z1 + Z3 + Z7 - Z9) / 4L^2$$

$$G = (-Z4 + Z6) / 2L$$

$$H = (Z2 - Z8) / 2L$$

$$I = Z5$$

Výstupem je nástroj křivost, který vypočítá druhou derivaci povrchu – sklon sklonu pomocí vzorce:

$$Kn = -2 (D + E) * 100$$

Tento nástroj se velmi často používá pro popis fyzikální vlastností povodí ve snaze pochopit eroze a odtokové procesy. Křivost má vliv na celkovou rychlost pohybu odtoku. Zakřivení tak ovlivňuje zrychlení a zpomalení proudění, a tedy vliv na erozi a ukládání sedimentů (Demek, 1988). Křivost také ovlivňuje konvergenci a divergenci toku.

Obdobně by tomu mělo být i v případě využití pro akcelerační a decelerační procesy v oblasti modelování cyklistické dopravy. Problémem však je to, že tento i další nástroje a metodiky výpočtově probíhají vždy pouze pro bodové prvky (pixely):

- ve směru spádnice – profile curvature neboli vertikální křivost,
- ve směru vrstevnic – planar curvature neboli horizontální křivost,
- na základě výše uvedeného proložení okolí buňky rastru polynomem 4. řádu – celková průměrná aproximovaná křivost v dané buňce na základě hodnot nejbližších 8 pixelů.

Ani jedna z výše uvedených hodnot však nepředstavuje geometrii silniční sítě. I proto bylo potřeba vytvořit metodiku a nástroj, který dokáže přiřadit křivost liniovému prvku v jeho libovolném směru a délce.

2.4 Zohlednění dalších parametrů

Délka segmentu je veličina, která se v podstatě nemění a pomocí GIS je relativně lehce zjistitelná. Problém však nastává v případě stanovení průměrné rychlosti, která je ovlivněna řadou dalších faktorů (proměnlivými faktory jako počasí, denní doba, technický stav dopravního prostředku atd.).

Stanovením průměrné rychlosti v závislosti na dalších charakteristikách se zabývá ve své diplomové práci Louthan (2010) viz kap. 2.3.5. Tato práce je však zaměřena na osobní automobilovou dopravu. V případě cyklistické dopravy řeší téma stanovení rychlosti Kosarová (2003) a zmiňovaný Tázlar (2012). Ti se orientují převážně na terén mimo městské prostředí (tj. dlouhé dílčí úseky – Kosarová, 2003), resp. městské prostředí (Tázlar, 2012). Kromě vlivu podélného sklonu zde nejsou zohledněny žádné další faktory (např. povrch). Z důvodu odlišného charakteru prací, vstupním datům, odlišnému měřítku (v našem případě téměř mikromodelování), kvalitě a naplněnosti datových sad a účelu práce byly tyto odvozené převodní rovnice rychlosti dle sklonu využity nakonec pouze jako možné srovnání s vlastním

řešením (viz kapitola 4.6.3). V následujících odstavcích jsou proto uvedeny další faktory a jejich vliv na oceňování grafu průměrnou rychlostí.

Maximální povolená rychlost

V ČR je rychlost definována podle § 18 zákona č. 361/2000 Sb. následovně: „Rychlost jízdy musí řidič přizpůsobit zejména svým schopnostem, vlastnostem vozidla a nákladu, předpokládanému stavebnímu a dopravně technickému stavu pozemní komunikace, její kategorii a třídě, povětrnostním podmínkám a jiným okolnostem, které je možno předvídat“ (Portál veřejné správy, 2010). Rovněž jimi se zpřesňuje výpočet ohodnocení grafu – nejrychlejší cesty či cestovního času. Rychlostní omezení se řídí příslušnými dopravními značkami, vč. označení začátku a konce obce. Mimo pokrytí se stanovují základní rychlostní omezení (obec / mimo obec), většina rychlostních omezení však nemá na výsledný pohyb cyklisty téměř žádný vliv z důvodu jejich naddimenzovanosti pro tento mód dopravy.

Typ komunikace

Hierarchické členění silniční sítě je jedním z nejdůležitějších faktorů pro stanovení rychlosti v dopravě automobilové. Do jisté míry se však jedná o více zahrnující faktor, kumulující v sobě některé ostatní, jako například počet jízdních pruhů, povrch či směrové rozdělení. Kategorizace pozemních komunikací v České republice vychází z legislativního zákona č. 13/1997 Sb. o pozemních komunikacích ve znění pozdějších změn. Označení pozemních komunikací (dále jen PK) definuje §2 odst. 1 až 5 vyhláška 104/1997.

V cyklistické dopravě se průměrná rychlost však neodvíjí od návrhové (či směrodatné) rychlosti dle typu silnice stanovené technickou normou ČSN 73 61 01 jako u motorizované dopravy, ale spíše v závislosti na pravděpodobné interakci s jinými druhy dopravy (zejm. pěší) nebo její intenzitě, jak potvrzují návrhové rychlosti v TP 179 (MD ČR, 2006), které pro tento mód existují, avšak nezohledňují sklonitost. Proto lze např. očekávat, že v pěší zóně povolené i pro cyklistickou dopravu nebo ve sloučené stezce pro cyklisty a pěší, bude obecně vyšší riziko výskytu chodců v jízdní dráze, a způsobí tak nutné snížení rychlosti. Díky velmi pestré skladbě jednotlivých typů dopravní infrastruktury, které však budou postihnuty na základě typu povrchu a stavu vozovky, nebude potřeba zahrnovat tento faktor do výsledného vzorce.

Příslušnost k intravilánu

Rychlostní limit je závazná mezní hodnota rychlosti, která nesmí být překročena. V ČR je stanoveno rychlostní omezení v obci na 50 km/h. Na železničním přejezdu a 50 m před ním je maximální povolená rychlost 30 km/h (bliká-li bílé světlo přejezdové signalizace, pak 50 km/h). V obytné a pěší zóně smí řidič jet nejvíce 20 km/h. Tyto omezení jsou daná zákonem a platí pro celé území ČR. Ani tato rychlostní omezení však nejsou pro cyklo dopravu důležitým (omezujícím) a signifikantním faktorem, a je možné je proto zanedbat z důvodu jejich obtížné dosažitelnosti v tomto módu dopravy a zároveň díky absenci těchto omezení (obytné a pěší zóny a železniční přejezdy) na trasách v zájmovém modelovém území (o něm více v podkapitole 4.6.1). Navíc tyto faktory jsou snadno implementovatelné dodatečně pomocí tzv. restrikcí (podkapitola 5.4.1) na síti PK.

Křivolakost infrastruktury

Tento parametr se dle ČSN 73 61 01 počítá na základě poloměru zatáček. Technická norma pro tento parametr používá termín křivolakost. Vypočítá se dle vzorce (ČSN 73 61 00, Obr. 12):

$$K = \frac{\sum_{i=1}^j \gamma_i}{L} ; [\text{grad/km}]$$

K – křivolakost

γ_i – úhlová změna v úseku i

L – délka linie

Obr. 12. Výpočet křivolakosti úseku PK (Zdroj: Bartoš, 2012)

kde: K je křivolakost, j počet částí úseku, součet úhlových změn a l délka úseku.

Křivolakost je tedy přímo úměrná součtu úhlových změn v jednotlivých dílčích částech (od 1 do j) v posuzovaném úseku a nepřímo úměrná jeho délce. Norma nespécifikuje přesně délku dílčích úseků, pouze požaduje, aby v úseku byly stejné nebo podobné charakteristiky. Směrodatná rychlost by se mezi dílčími úseky neměla lišit o více než 10 km/h. Obecně je křivolakost definována jako průměrná úhlová změna na jednom kilometru trasy. Směrodatná rychlost je stanovena na základě návrhové rychlosti, sklonových poměrů a křivolakosti (VUT, 2012). Nicméně vždy se jedná pouze o návrhové rychlosti pro silniční motorizovanou dopravu. Pro cyklistickou dopravu v závislosti na sklonových poměrech a křivolakosti žádné neexistují. Výpočet křivolakosti např. uvádí ve své práci i Bartoš (2012), ten však práci opět směřuje na zlepšení modelů dostupnosti automobilové silniční dopravy.

Vzhledem k malému měřítku cyklisty k běžné dopravní infrastruktuře a obecně nízké rychlosti, není tento parametr ve většině případů tolik omezující jako např. právě u automobilů, které musí při průjezdu stejnou zatáčkou svoji standardní rychlost řádově mnohem více snížit než cyklista. Problémy pak může přinést spíše použití pro cyklisty u nevhodné infrastruktury (např. značně se klikatící pěšiny – ty však nebyly součástí terénního výzkumu) nebo výskyt ostřejších zatáček na jinak víceméně rovných úsecích. S tímto úzce souvisí i šířka komunikace, především cykloturistických a turistických tras, stezek a pěšin. Vzhledem k absenci těchto specifických údajů (u stezek a pěšin) a množství úseků v zájmové dopravní síti by byl tento faktor těžko definovatelný. K výše uvedeným skutečnostem však nebyl tento parametr do analýzy průměrné rychlosti zahrnut.

Proměnlivé faktory

Tato skupina faktorů je pro dopravu důležitá, ovšem nemohou být jednoznačně popsány a předpovídány. Jsou velice individuální, nepravidelné a proměnlivé. Mohou být tedy jen těžko zahrnuty mezi parametry ovlivňující rychlost v prostředí GIS.

Jedním ze zásadních proměnlivých faktorů je počasí a denní doba. Při nepříznivých podmínkách s deštěm, mlhou, sněhem, špatnou povětrnostní situací či viditelností se snižuje plynulost a rychlost dopravy a zhoršují se smykové vlastnosti vozovky.

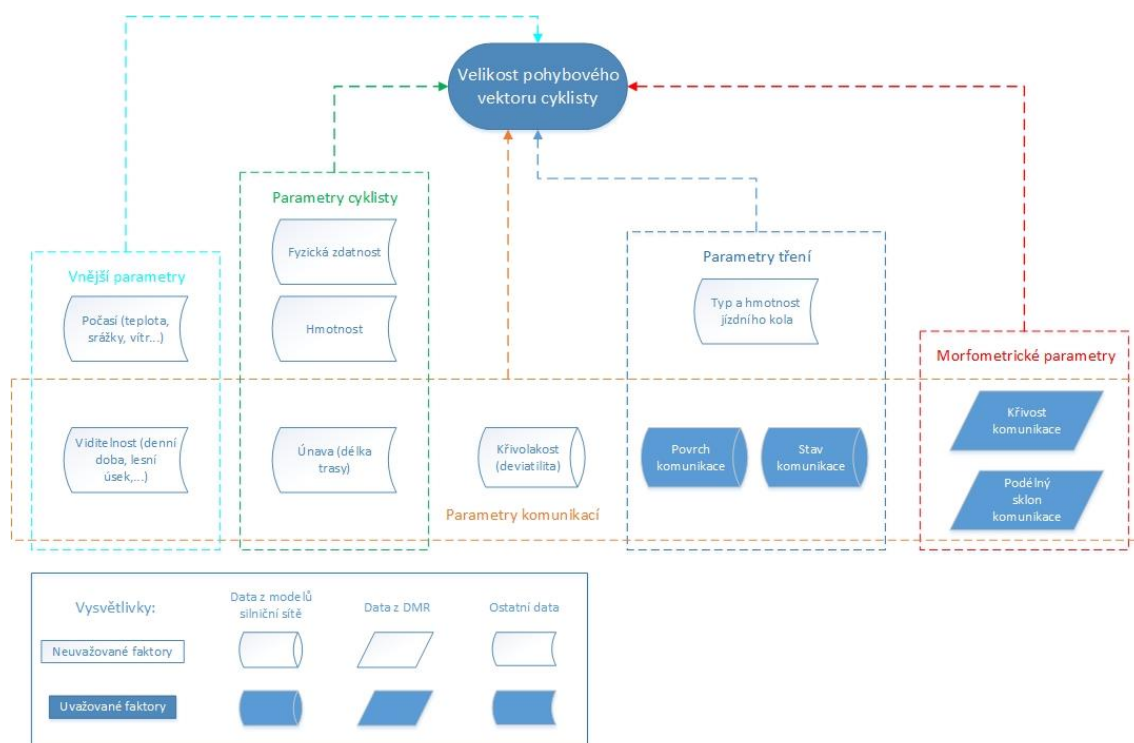
Intenzita provozu je rovněž faktorem, který se velmi složitě posuzuje. Na frekventovaných místech a ve městech je intenzita největší, ovšem i v těchto místech se mění s denní dobou. Je také rozdíl porovnávat intenzitu v nočních hodinách a v běžný pracovní den, kdy je silniční a provoz dostatečně hustý a neumožňuje až na výjimky plynulou jízdu s vyšší průměrnou rychlostí. Důležitý pro plynulost je i podíl nákladní dopravy. V místech s vyšší intenzitou dopravy stoupá i faktor nehodovosti, který nelze pro všeobecný model použít, jelikož se jedná o

nepravidelně rozložené jevy a docházelo by k nesprávnému ovlivnění výsledných hodnot. S tím souvisí i data pro uzavírky a dopravní omezení, které je velice složité zpětně dohledat. Navíc se jedná vždy o lokální omezení rychlosti označené na místě dopravní značkou.

Na závěr je třeba zmínit faktory nejvíce individuální a proměnlivé, ovšem neméně důležité. Jedná se o vlastnosti a stav dopravního prostředku a uživatele. S tím souvisí i běžné zpomalování jízdy při nutných zastávkách či pouze jako času pro odpočinek. Výzkum je však prováděn v oblastech, vzdálenostech a na měřítku, kde by tyto zastávky neměly být relevantní, navíc jejich implementace je možná např. pomocí určitých koeficientů vzdálenosti, únavy apod. dodatečně.

2.5 Výběr parametrů

Výběr parametrů byl dán tématem, účelem práce a možnostmi jednotlivých vstupních datových sad, které byly vybrány na základě analýzy kvality a min. požadavků na ně kladené (více v kapitole 3). Základem bylo zapojení faktorů spojených s DMR – **sklon**, **křivost** (vertikální zakřivení) a **typ povrchu** terénu (reliéfu), kterým je v případě této práce povrch cestní sítě, jak ukazuje Obr. 13 (schéma) níže.



Obr. 13. Schéma vybraných parametrů a jejich zdrojových dat (Zdroj: výzkum autora)

2.6 Síťové analýzy

Ohodnocená síť dle výše uvedených parametrů se nejčastěji využívá při síťových analýzách. Ty modelují vzájemné vazby pro tyto komponenty: zdroje (materiály, které se mají v síti přesouvat), cíle (kam se tyto materiály přesunují) a soustavu podmínek, definujících propojení sítě mezi uzly (Jančík, 1998; cit. v Nový, 2008).

Vedle některých velice složitých nástrojů pro správu a analýzu modelů dopravních sítí v dopravním inženýrství je možné v řadě případů využít i univerzálnější GIS aplikace, využívající zmiňované síťové analýzy, zejména pokud jsou k dispozici určité programové nadstavby, moduly či extenze, které umožní tyto pokročilejší úlohy vykonávat (Sladký, 2007). Navíc většina z těchto programů poskytuje prostor pro vlastní úpravu funkcí a rozšíření (např. pomocí skriptů v některém z programovacích jazyků). V tabulce níže je uveden výběrový seznam komerčního i open source softwaru, který dokáže zpracovávat odpovídající data a realizovat základní síťové analýzy, které budou využity i při této práci a které jsou postupně popsány pod Tab. 4.

ORGANIZACE	SOFTWARE
ESRI	ArcGIS Desktop 8.x – 10.x, ArcView GIS 3.x (+Network Analyst)
Autodesk	AutoCAD Map 3D
Intergraph	GeoMedia 3D (+Transportation Analyst, Transportation Manager)
Bentley	MicroStation GeoGraphic
OSGeo*	GRASS GIS (+ vybraný modul – např. <i>v.net</i> , <i>d.path</i> , <i>v.net.path</i> , <i>v.net.salesman</i> ,...)
OSGeo*	Quantum GIS Desktop (+ odpovídající knihovna)

* Open Source Geospatial Foundation, neboli OSGeo je nezisková organizace, která vyvíjí open source programy pro práci s prostorovými daty

Tab. 4. SW využívané pro síťové analýzy v dopravě (Zdroj: Tázlar, 2012)

Výběr vhodného SW řešení je uveden na začátku metodiky – kapitoly 4.

Jednou ze základních síťových analýz, která je využita v této práci pro hodnocení přesnosti navržené metodiky, je analýza cesty (Pantůčková, 2012). Ta se řadí se mezi základní optimalizační úlohy, v nichž se hledá řešení nejlépe splňující vstupní podmínky. Vyřešení analýzy trasy může znamenat nalezení libovolné, nejrychlejší, nejkratší nebo cesty s nejnižšími náklady v závislosti na zvolené impedanci. Pokud je impedancí čas, pak je nejlepší cesta cestou nejrychlejší.

Právě hledání optimální cesty je jednou z nejčastějších aplikací, které jsou nad sítěmi prováděny s tím, že ve většině případů je k řešení použita teorie grafů. Horák (2002) rozlišuje tři základní úlohy hledání cesty:

- libovolné cesty - bez dalšího omezení,
- nejkratší cesty - délka cesty je určena součtem délek vybraných hran tvořících cestu (Demel, 2002) a v případě neohodnocené sítě je délka vyjádřena počtem hran),
- s nejnižšími náklady - zde se jedná o nejmenší součet hodnot jednotlivých segmentů cesty (času, koeficientů apod.).

Součástí analýzy cesty by tak měl být nejen její výběr, ale také ukazatel jejího celkového ohodnocení, v případě času se jedná o výpočet doby trvání cesty, tj. doby nutné pro projetí dané trasy z počátečního (origin) do cílového bodu (destination), ten bude velmi důležitý při samotném terénním průzkumu a následné verifikaci v modelech i za pomoci vyhledávacích algoritmů.

Routovací (vyhledávací) algoritmy

Pro nalezení cesty s nejnižšími náklady se většinou využívají některé druhy vyhledávacích (routovacích) algoritmů. Obecně nejčastěji používaným vyhledávacím algoritmem je tzv. Dijkstrův algoritmus, který poprvé popsal nizozemský informatik Edsger W. Dijkstra (1959). Jedná se o základní algoritmus, který je využíván většinou SW GIS při hledání optimální cesty,

proto je mu věnována větší pozornost než dalším níže jmenovaným. Aplikuje se v případě hledání nejkratší cesty v hranově kladně ohodnoceném orientovaném grafu, což je pro náš případ postačující z důvodu výskytu pouze kladných hodnot průměrné rychlosti či času (v případě záporně ohodnocených hran se používá např. Bellman-Fordův). Počet průchodů cyklu, kdy je do množiny navštívených vrcholů vždy jeden přidán, je možných nejvýše tolik, kolik je v grafu vrcholů. Algoritmus je tedy konečný.

Ostatní algoritmy, které umožňují hledat optimální trasu v grafech, zde nebudou v důsledku podrobného popisu v jiných materiálech blíže rozebírány. Např. v bakalářské práci Nalezení optimálního spoje MHD využitím grafových algoritmů (Sladký, 2007) jsou vedle zmíněných řešeny i Floyd-Warshallův algoritmus (nejkratší cesta mezi každými dvěma vrcholy grafu), Johnsonův algoritmus (vícenásobné použití Dijkstrova algoritmu), A* search algoritmus (nejkratší cesta mezi počátečním a koncovým uzlem na principu heuristického odhadu). Také je zde popsán problém obchodního cestujícího a možnosti řešení této složité úlohy, která je také jednou ze základních síťových úloh.

Protože existuje mnoho různých grafů se specifickými vlastnostmi, neexistuje jedna univerzální nejlepší metoda pro vyhledávání optimální cesty. Pro větší grafy mohou být vhodnější algoritmy s nižší asymptotickou složitostí, různé postupy se také aplikují při jednorázovém nebo při násobném hledání nad stejným grafem. V oblasti navigačních systémů se však z důvodu rychlosti výpočtů a velikosti grafů častěji využívá různé modifikace algoritmu Contraction hierarchies. Tento algoritmus však využívá předpočtených hierarchických hodnot a heuristických metod, a je tak částečně ztrátový. Více uvádí např. Flinzenberg (2004).

Dalšími síťovými úlohami, které se obvykle v prostředí GIS řeší, jsou podle Pantůčkové (2012):

- analýza nejbližších zařízení,
- analýza cenových matic,
- analýza lokace-alokace,
- analýza rozvozního problému,
- analýza servisních zón (zón obslužnosti neboli dostupnosti).

Tyto další síťové analýzy nebudou v práci řešeny, nicméně i díky korektně ohodnocené datové sadě je bude potenciálně možno do budoucna řešit přesněji, např. v případě OD cenové matice, nejbližších zařízení či zón dostupnosti, které jsou také velmi často používány různými modely dostupnosti využívanými např. i stanovování základní dopravní obslužnosti (akcesibility) apod. (Jarolímek, 2005). Nedílnou součástí těchto analýz jsou i kvalitní vstupní data v podobě síťových struktur a datasetů.

3 IDENTIFIKACE A VÝBĚR DATOVÝCH SAD

Pro potřeby diplomové práce bylo nutné zajistit potřebná data, jak z oblasti digitálních modelů silniční sítě, tak i výškopisná data pro určení morfometrických parametrů terénu. Se zvyšující se intenzitou práce s těmito daty, je potřeba normalizace týkající se geografických informací stále častější (Šrámek, 2011). Aby bylo možné zaručit kvalitu vstupních dat pro zaměření této práce danou i jejími cíly a účely, je důležité určit především minimální požadavky na kvalitu jednotlivých datových sad. Standardy kvality prostorových dat vychází především z ISO/TC 204 a 211, pro potřeby práce bude potřeba především srovnání s následujícími používanými standardy:

- ISO 19113 Geographic information – Quality principles (zásady jakosti),
- ISO 19114 Geographic information – Quality evaluation procedures (postupy hodnocení jakosti),
- ISO 19115 Geographic information – Metadata,
- ISO 14825 Intelligent transport systems (Inteligentní dopravní systémy) – Geographic Data Files (GDF) – Geografické datové soubory.

Většina autorů jako např. Šrámek (2011) se při popisu parametrů kvality prostorových dat řídí parametry, které jsou dány normami ISO. Normy ISO však neřeší všechny parametry kvality, které bývají producenty nebo uživateli posuzovány. Některé další používané parametry kvality uvádí (nebo uváděly dříve) jiné standardy. Následující odstavce uvádějí prvky kvality prostorových dat, které vycházejí společně ze všech norem, jež byly uvedeny výše, a jsou považovány za důležité jak pro producenty dat, tak pro jejich uživatele.

Prvky kvality, ze kterých lze získat přímo informace o kvalitě	ISO 19113	ENV 12656	FIPS 173	GDF	ATKIS
Úplnost	X	X	X	X	X
Logická konzistence	X	X	X		X
Polohová přesnost	X	X	X	X	X
Časová přesnost	X	X			X
Tematická / atributová / sémantická přesnost	X	X	X	X	X
Rozlišení				X	
Preciznost				X	
Správnost				X	
Aktualizace				X	
Prvky kvality, ze kterých nelze získat přímo informace o kvalitě	ISO 19113	ENV 12656	FIPS 173	GDF	ATKIS
Původ (rodokmen)	X	X	X		
Homogenita		X			
Kvalitní dokumentace		X			
Účel	X				X
Použitelnost	X				X
Historie					X

Tab. 5. Porovnání standardů kvality prost. dat z hlediska výskytu prvků kvality (Zdroj: Šrámek, 2011)

Dle normy ČSN ISO 19113 jsou prvky kvality děleny na kvantitativní a nekvantitativní. Ze všech uvedených prvků (kritérií) kvality prostorových dat jsou vybrána a definována pro hodnocení v této práci následující:

Kvantitativní kritéria

- **Polohová přesnost** – základní kritérium kvality, používané ve všech normách, včetně normy ČSN ISO 19113. Toto kritérium je nezbytnou součástí každého hodnocení kvality prostorových dat. Vyjadřuje odchylku geografické polohy objektu v databázi od skutečné polohy, která bude důležitá pro oba druhy vstupních dat.
- **Tematická (sémantická) přesnost** – kritérium kvality uvedené v normě ČSN ISO 19113. Popisuje přesnost všech atributů, které nemají polohový nebo časový charakter. Tematická přesnost je důležitým kritériem kvality pro popis přesnosti atributů a popisných údajů. V některých zdrojích je tematická přesnost provázána či nahrazena sémantickou přesností, která v této práci bude zohledňována u digitálních modelů silniční sítě.
- **Časová přesnost (aktualizace)** – kritérium kvality podle normy ČSN ISO 19113. Toto kritérium je velmi důležité pro popis časového aspektu prostorových dat. Součástí časové přesnosti je hodnocení správnosti a přesnosti měření času, časové platnosti či časové konzistence. U dat za silniční síť bude uvažováno kritérium aktualizace.
- **Logická konzistence, úplnost, správnost a preciznost** – kritéria, která jsou součástí většiny norem kvality prostorových dat včetně ČSN ISO 19113. Popisují míru dodržení logických vztahů prvků v databázi neboli logická pravidla v databázi. Zahrnují topologickou a tematickou konzistenci a konzistenci vztahů mezi prostorovými a popisnými informacemi. Velmi důležitými aspekty kvality prostorové databáze jsou především topologická a tematická konzistence, proto je toto kritérium taktéž součástí sady pro tuto práci. Splněním této normy navíc garantuje kvalitu datové sady silniční sítě pro využití v síťových analýzách, a není tak nutné v ní kontrolovat topologické vztahy.
- **Rozlišení** – toto kritérium není uvedeno v normě ČSN ISO 19113, ale je součástí normy GDF a je užíváno mnoha dalšími autory. Rozlišení udává hustotu údajů v zájmovém území. Jsou zaznamenávány tři druhy rozlišení – prostorové, časové a tematické. Toto kritérium kvality je důležitou součástí sady kritérií pro hodnocení kvality prostorových dat, protože je spojeno se základním kritériem – přesností. Kvalita v podobě přesnosti může být určována na základě rozlišení. Prostorová databáze s nižším rozlišením vyžaduje nižší požadavky na přesnost. Proto nelze hovořit o nepřesnosti dat, např. kdy hodnota odchylky skutečného objektu a prvku v databázi je 10 m, pokud je používáno rozlišení, kdy nejmenší objekt ve vektorové databázi má velikost 10x10 km.

Nekvantitativní kritéria

- **Původ** – kritérium je součástí normy ČSN ISO 19113 a některých dalších norem, ve kterých je někdy zaměňováno s rodokmenem. Mnozí autoři rozlišují původ a rodokmen, kdy původ 44 hovoří o zdrojích dat a rodokmen spíše o celé historii zpracování dat. V této práci však bude použito pouze jedno kritérium – původ, zahrnující taktéž informace o historii zpracování dat či o metodách sběru a tvorby dat.
- **Účel** – kritérium uvedené v normě ČSN ISO 19113. Popisuje důvod tvorby datové sady a její plánované užití. Skutečné užití popisuje kritérium uplatnění. Toto kritérium je velmi důležité pro hodnocení kvality dat, protože z něj lze usoudit, zda se daná datová sada vůbec hodí pro dané užití.
- **Použitelnost (uplatnění)** – kritérium taktéž uvedené v normě ČSN ISO 19113 a používané v systému ATKIS. Hovoří o užití datové sady jejím producentem či jejími uživateli. Uvádí také, pro které aplikace byla již data použita. Kritérium uplatnění je důležitým prvkem hodnocení kvality prostorových dat, protože může být indikátorem vhodnosti použití dat.
- **Dostupnost** – Dostupnost popisuje, zda jsou používaná data k dispozici ve správný čas na správném místě. Dostupnost také hovoří o autorských právech vztahujících se k datům.

Níže uvedená jsou základní kritéria využitá pro hodnocení obou datových sad, tj. dat výškopisných – DMR a zároveň také digitálních modelů silniční sítě:

- Aktualizace – četnost.
- Pokrytí – rozsahu území nebo kategorií.
- Přesnost – určení polohové či výškové složky.
- Datový formát a kvalita dat – ve kterém jsou data poskytována;
- Atributová přesnost a úplnost, měřítko – pro které jsou data vhodná.
- Vlastník/správce – který data garantuje.
- Dostupnost – na internetu, zdarma,...
- Popis užití, způsob sběru, datové struktury a metadata.
- Standardy kvality – tvorba dat na základě normovaných specifikací.

Tyto základní kritéria jsou u jednotlivých typů vstupních dat zároveň doplněny o další pro ně specifická kritéria. Výsledné hodnotící tabulky uvádí Příloha 1 a Příloha 2 pro datové sady silniční sítě a Příloha 3 pro DMR.

3.1 Digitální modely reliéfu

Digitální model reliéfu (DMR) je model povrchu země bez staveb, stromů a dalších objektů na jeho povrchu v digitální podobě, která dovoluje jeho zpracování prostředky informačních a komunikačních technologií (Štych a kol, 2008). V souvislosti s geometrickým popisem reliéfu v GIS prostředí hrají největší roli morfometrické parametry. Pro geografy představuje DMR velmi významný nástroj pro aplikace, které zpracovávají zemský povrch v geomorfologii, hydrologii a dalších fyzicko-geografických disciplínách (Voženílek, 2001). DMR a samotné morfometrické parametry lze také využít při studiu některých oborů socioekonomické geografie. Důležitou otázkou proto bylo, jaký formát DMR vybrat jako ten nejvhodnější pro účely této práce. Jak již z rešeršní části vyplývá, většina autorů se přiklání k výpočtu morfometrických charakteristik terénu na základě gridových DMR. Pro definici některých pojmů je třeba uvést základní členění DMR.

3.1.1 Druhy dat

K reprezentaci reálného terénu je možné využít mnoho přístupů. Potenciální vstupní data práce mohou tvořit tzv. nekompletní reprezentaci povrchu (výškové body, vrstevnice,...) nebo mohou být spojitá (rastry). Vrstevnice mají určitý interval (např., DMÚ 25 – 5 m, interval vrstevnic ZABAGED se mění v závislosti na výškové členitosti mapového listu od 1 m po 5 m), výškové body zase určitou hustotu v závislosti na způsobu sběru dat (výběrové body terénní kostry získané GPS vs. husté body z LIDAR snímkování). V praxi se také setkáváme s reprezentací povrchu pomocí Triangulated Irregular Network (TIN – nepravidelná trojúhelníková síť).

TIN

Podle Uršuláka a Paciny (2010) je triangulace vstupních bodů do podoby TIN velmi všestranným způsobem reprezentace reálného terénu. Výsledné trojúhelníkové plošky TIN jsou většinou považovány za rovinné a díky tomu poskytují plně definovaný a spojitý model terénu. Hlavní výhodou triangulovaných povrchů je dle Kadlčíkové (2007) adaptabilita s ohledem na vstupní data:

- oblasti s velkou variabilitou terénu jsou pokryté hustou sítí bodů → vzniká velké množství malých trojúhelníků,
- ploché oblasti (nebo s konstantním sklonem) obsahují méně bodů = vznikají velké trojúhelníky.

Narozdíl od TIN jsou reprezentace povrchu pomocí pravidelného rastru náchylné k nadhodnocení nebo podhodnocení (z angl. overestimation, underestimation) při pokrývání oblastí s výrazně odlišnou strukturou a členitostí. Pravidelný rastr má pevně stanovenou velikost buňky a při změně členitosti terénu pak rovinnou oblast pokrývá rastrem s malou velikostí buňky nebo naopak členitý terén rastrem s velkou velikostí buňky (např. kontrast Mostecká pánev a Krušné hory).

V datovém modelu TIN jsou body uloženy společně s jejich nadmořskou výškou. Každý trojúhelník pak obsahuje informaci, ze kterých hran se skládá a každá hrana obsahuje informaci, které body ji definují. TIN je po částech lineární model, který může být v prostoru vizualizován jako jednoduše propojená síť trojúhelníků, která je sice spojitá, ale není v celé oblasti diferencovatelná, což může být pro účely této práce omezující. Další nevýhodou také může být to, že většina softwarů (dále jen SW) GIS nedokáže s touto formou dat pracovat výpočetně v oblasti určování morfometrických parametrů prvního (sklon) natož druhého řádu (křivost). Z tohoto důvodu, důvodech uvedených v rešeršní části, potenciální možnosti srovnání výsledků s metodikami v dalších pracích byl tento formát dat určen jako vhodný pro využití v této práci.

Rastr

Dalším velmi rozšířeným typem kompletní reprezentace povrchu je rastr. Základním stavebním prvkem rastrové struktury je buňka (cell, pixel). Buňky jsou organizovány do mozaiky a obsahují hodnoty, které reprezentují daný jev (Uršulák et al., 2010). U rastrů se používá několik tvarů buněk – čtyřúhelníková, trojúhelníková a hexagonální. Tyto reprezentace mají jasně definovanou topologii (víme přesně, která buňka sousedí se kterou), toto je právě velmi často využíváno při výpočtech morfometrických charakteristik terénu. Nejčastěji se budeme setkávat s pravidelným čtvercovým rastrem, protože tato reprezentace je jednoduchá a je orientovaná v souladu s kartézským souřadnicovým systémem. Každý rastr má také definované rozlišení (velikost buňky), které udává, jak velké skutečné území jednotlivá buňka reprezentuje. Rastr se obecně využívá k reprezentaci spojitého jevu nad definovanou oblastí. Může se tedy jednat o DMR a z něj odvozené povrchy (sklon, orientace, křivosti, ...), ale také např. o mapu znečištění ovzduší, srážky, průměrnou teplotu nebo také např. dopravní dostupnost vybraných oblastí. Výpočty sklonu, křivosti probíhají na základě vzájemné sousednosti jednotlivých buněk. V případě sklonitosti se jedná o určování velikosti ve směru největšího (spádnice), v případě křivosti pak ve směru nejmenšího (vrstevnice) i největšího (spádnice), příp. celkové křivosti. Rastrový podklad je pro tyto prostorové analýzy nejvhodnějším druhem výškových dat, jak dokazuje i rešeršní část. Při práci proto bude nutné jednotlivé vstupní sady DMR upravit do tohoto formátu za pomoci vhodných interpolačních metod, zvolit správné vhodné rozlišení a další parametry pro potřeby přesného určení veličin z něj odvozených.

3.1.2 Identifikace zdrojů

V našich podmínkách jsou nejčastější data ve formě vrstevnic, popřípadě výškových bodů (kót). Datové zdroje, které kompletně pokrývají území ČR, jsou např. data poskytovaná Českým

úřadem zeměměřickým a katastrálním (ČÚZK, ZABAGED - Základní báze geografických dat) nebo také Vojenským geografickým a hydrometeorologickým úřadem v Dobrušce – DMÚ 25. Zdarma dostupný je však i DMR ČR v rastrové podobě z mise (SRTM) raketoplánu Endeavour (ArcData, 2012). Obecně můžeme říci, že v ČR je k dispozici celá řada map, které obsahují výškopis (např. turistické mapy). Ten je nicméně přebírán nejčastěji právě z dvou prvně jmenovaných zdrojů. Vzhledem k tomu, že touto problematikou se v oblasti GIS obšírně zabývá spousta dalších autorů, níže jsou uváděny pouze ty nejdůležitější z nich:

ZABAGED - výškopis grid 10 x 10 m, 3D vrstevnice

Výškopisnou část doplňuje odvozený digitální model terénu v podobě pravidelné mříže (10x10 m) trojrozměrně vedených (3D) bodů (ČÚZK, 2009) nebo třemi typy objektů vrstevnic se základním intervalem 5, 2, nebo 1 m v závislosti na charakteru terénu. Výškopis - 3D vrstevnice je doplněn vybranými dalšími výškopisnými prvky – klasifikovanými hranami a body. Přesnost výšky je závislá na sklonu a členitosti terénu a dosahuje 0,7-1,5 m v odkrytém terénu, 1-2 m v sídlech a 2-5 m v zalesněném terénu. Tato přesnost je vysoká, avšak především v lesních terénech byla vyhodnocena jako nedostačující.

ZABAGED - DMR - 4. a 5. generace (4G, 5G)

Digitální model reliéfu České republiky 4. generace (DMR-4G) představuje zobrazení přirozeného nebo lidskou činností upraveného zemského povrchu v digitálním tvaru ve formě výšek diskrétních bodů:

- v pravidelné síti (5x5 m) – 4G,
- ve formě výšek diskrétních bodů v nepravidelné trojúhelníkové síti (TIN) – 5G.

Body jsou znázorněny pomocí souřadnic X, Y, H, kde H reprezentuje nadmořskou výšku ve výškovém referenčním systému Balt po vyrovnání (Bpv) s úplnou střední chybou výšky 0,3 (0,18) m v odkrytém terénu a 1 (0,3)¹¹ m v zalesněném terénu (ČÚZK, 2009). Přesnost těchto datových sad již plně vyhovuje potřebám diplomové práce.

DMÚ 25

Druhým významným zdrojem kvalitních topografických dat je vojenské mapové dílo. Správcem digitálních produktů odvozených z vojenských topografických map je Vojenský geografický a hydrometeorologický úřad (VGHMÚř) se sídlem v Dobrušce. I zde najdeme jak rastrové mapy, tak vektorové databáze. Dílem srovnatelným se ZABAGED je digitální model území DMÚ 25. Jedná se o vektorovou databázi topografických informací o území, která svou přesností a obsahovou náplní koresponduje s vojenskými topografickými mapami měřítko 1:25 000, což do jisté míry omezuje její polohovou i výškovou přesnost. Databáze obsahuje topografické objekty rozdělené do 7 tematických vrstev včetně komunikací. Databáze je bezešvým digitálním modelem celého území České republiky s mírným přesahem přes státní hranici. Narozdíl od databáze ZABAGED nekončí na státní hranici, ale zobrazuje ještě několik kilometrů široké pásmo sousedních států (T-Mapy, 2012).

GDEM, SRTM, GTOPO30

Další modely se povětšinou řadí mezi modely globální (světové či evropské) vznikající mozaikováním a úpravou dat pořízených při misích raketoplánů či radarových dat, při které jsou pořizovány modely reliéfu často i celého světa. Jejich maximální výškové i polohové přesnosti však nedokáží postihnout členitost terénu, a proto nejsou pro účely této práce vhodné.

¹¹ Hodnoty v závorkách jsou uvedeny pro DMR-5G.

Všechny datové sady DMR včetně údajů o jednotlivých hodnotících kritériích je možné nalézt v: Příloha 3.

3.1.3 Požadavky a zdůvodnění výběru

Aby byla vybrána správná datová sada obsahující výškopisná data, musí splňovat určitá kritéria (viz Tab. 6), o jejichž stavu k jednotlivým bodům informuje Příloha 3.

Kritérium	Požadovaná min. hodnota	Splňují datové sady
Územní pokrytí	rozsah území ČR do konce roku 2013	všechny
Polohová přesnost (poziční přesnost)	min. 5 m	DMR-4G, DMR-5G
Výšková přesnost	min. 1m odkrytý terén, 2m zbylé území	DMR-4G, DMR-5G
Datový formát	SHP, TXT, rastr	všechny
Dostupnost dat	min. pro vědecké a výzkumné práce zdarma (důležité pro další analýzy)	všechny
Aktuálnost dat	stáří max. 10 let	DMR-4G, DMR-5G, ZABAGED – 3D vrstevnice, ZABAGED – výškopis grid, DMÚ25, SRTM, GTOPO30

Tab. 6. Požadované hodnoty kritérií pro výběr datové sady (Zdroj: výzkum autora)

Na základě analýzy datových zdrojů DMR byla jako nejvhodnější datová sada vybrán DMR-4G od CUZK díky jeho poskytovanému formátu dat, velmi přesným hodnotám přesnosti, kterých dosahuje jak v oblasti odkrytého, tak v oblasti zbylého území a díky 100% pokrytí, které lze očekávat do konce roku 2013. První z údajů, výškovou přesnost, zároveň také splňuje DMR-5G. Hodnoty přesnosti u něj dokonce převyšují DMR-4G (viz Příloha 3), s ohledem však na maximální polohovou přesnost (geometrii) silniční sítě (hodnota kritéria min. 5m), míst, kde dochází ke zpřesnění DMR-4G pomocí DMR-5G (většinou místa mimo silniční síť), s tím souvisejícímu „zhlazení“ sítě PK a velikosti zpracovávaných dat pro účely této práce bude postačovat DMR-4G. Od této části tak veškeré údaje o datech za DMR vychází z této výškopisné sady.

3.2 Cestní síť

Narozdíl od digitálních výškových modelů, jejichž analýzami se zabývá celá řada autorů z oblasti GIS, oblast modelů silniční sítě je v tomto segmentu více neprozkoumaná, proto bylo potřeba definovat některé pojmy z oblasti GIS-T¹².

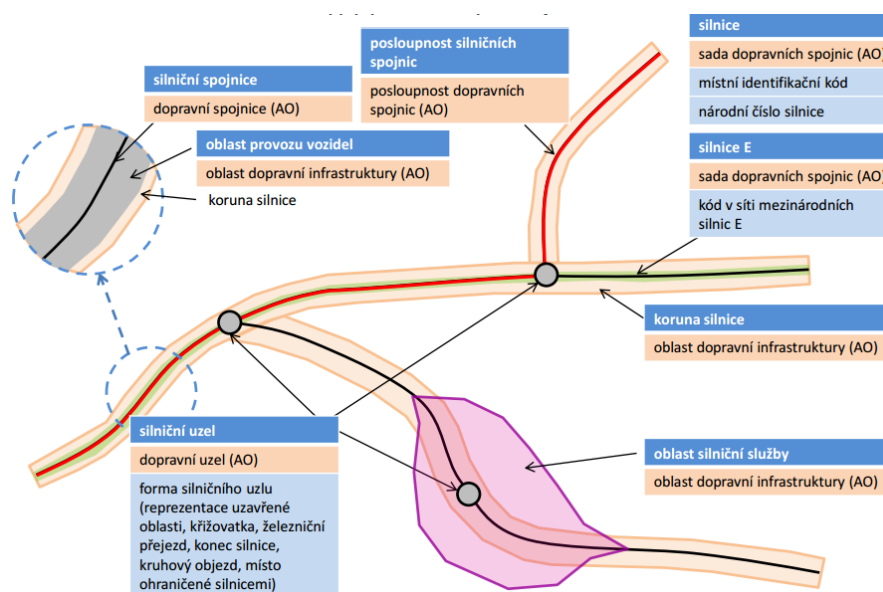
Digitální model silniční sítě (v silničním hospodářství georeferenční síť pozemních komunikací, ŘSD, 2012) lze z matematického hlediska definovat v dvourozměrném euklidovském prostoru jako smíšený (hrany mohou a nemusí mít směrovou orientaci), spojitý graf sítě, který je tvořen množinami vrcholů, hran, lomení hran, které vytvářejí segmenty linie, a incidencí (Šeda, 2003). Incidence přiřazuje každé hraně uspořádanou dvojici jejich krajních vrcholů a uspořádanou množinu bodů lomení hrany. Tyto prvky množin jsou entitami grafu,

¹² GIS-T se často používá pro výzkum a přizpůsobení GIS pro plánování a řízení v oblasti dopravy (Thill, 2000).

kteří jsou uloženy v databázi a tvoří spolu s atributy entit geodata, jejichž soubor utváří jednotný elektronický (digitální) model v prostředí GIS (Sladký, 2007).

V oblasti GIS –T používaných v silničním hospodářství ČR jsou vrcholy grafu označovány jako uzly, lomená hrana jsou vlastní segmenty linie oddělené lomovými body, které celkově reprezentují úsek, jehož geometrii určuje polygonový sled a lomení hran jako vrcholy polygonového sledu (ŘSD, 2012).

Georeferenční síť pozemních komunikací (dále jen „Georeferenční síť PK“) je tvořena množinou úseků, které na sebe spojitě navazují v uzlech. Uzly jsou tvořeny v místě připojení těles pozemních komunikací (křižovatkách) nebo ve významných bodech sítě pozemních komunikací (místo administrativního členění aj., ŘSD, 2012).



Obr. 14. Dvoudimenzionální silniční síť (Zdroj: D2.8.I.7 INSPIRE Data Specification on Transport Networks – Guidelines.)

Každý úsek georeferenční sítě PK vyjadřuje určitou část pozemní komunikace. Prvky množiny lomení hran tvoří body definované v geodetickém referenčním systému. Geometrický průběh úseku vyjadřuje směrové vedení těles pozemních komunikací (tj. osu komunikace) v kolmém průmětu na zemský povrch, jak ukazuje Obr. 14 výše. Geometrie úseku je v grafu sítě vyjádřena lomenou hranou s incidencí, přičemž geometrický průběh úseku určují prvky z množiny lomení hran (segmenty).

Pro každou georeferenční síť PK by měla být specifikována polohová přesnost a měřítko, pro které je daná sada geodat určena. V dané sadě georeferenční sítě PK je každému úseku přiřazeno jedinečné číslo úseku a délka úseku, která odpovídá ujeté vzdálenosti změřené v terénu mezi počátečním a koncovým uzlem daného úseku. Délka úseku by měla být udávána v délkových jednotkách s přesností na celé metry.

Dle zákona č. 13/1997 Sb., pozemní komunikace je dopravní cesta určená k užití silničními a jinými vozidly a chodci, včetně pevných zařízení nutných pro zajištění tohoto užití a jeho bezpečnosti. Pozemní komunikace se dělí na dálnice, silnice, místní komunikace a účelové komunikace.

3.2.1 Identifikace zdrojů

Vzhledem k rozmanitosti datových sad a velké rozdílnosti atributové složky bylo třeba analyzovat více datových souborů potenciálně využitelných v této práci. Z dosavadního zjištění vyplývá, že georeferencování informací, jevů a událostí v síti pozemních komunikací v současnosti v ČR probíhá nad datovými podklady různého původu, polohové přesnosti a v různých souřadnicových systémech. Nejrozšířenějšími podklady pro lokalizaci pasportu tj. polohy součástí a příslušenství pozemních komunikací, staveb, oprav a údržby, tzn. pro majetkovou evidenci vlastníků a správců komunikací, je Uzlový lokalizační systém (dále jen ULS). Pro lokalizaci dopravních informací a informací z telematických zařízení je používána síť Global Network (dále jen GN).

ULS

Jedná se o digitální model pozemních komunikací, Georeferenční síť PK, sloužící pro prostorovou lokalizaci dopravních informací, pasportních údajů o majetku pozemních komunikací a dalších jevů souvisejících s pozemními komunikacemi. Uzlový lokalizační systém zahrnuje pozemní komunikace v rozsahu dálnic a silnic I., II. a III. třídy. ULS je určen pro lokalizaci polohy součástí a příslušenství pozemních komunikací, staveb, oprav a údržby, tzn. pro majetkovou evidenci vlastníků a správců komunikací. Byl odvozen z DMÚ 25.

Je využíván Odborem silniční databanky (SDB) se sídlem v Ostravě jako jedním ze samostatných specializovaných pracovišť Ředitelství silnic a dálnic. SDB se stará o plynulý provoz Informačního systému o silniční a dálniční síti České Republiky na sledovaných komunikacích v Národním dopravním informačním a řídicím centru (ŘSD, 2012).

StreetNET CZE (GN)

Jedná se o kompletní routovatelnou silniční a uliční síť České republiky od společnosti Central European Data Agency, a.s. (CEDA). K liniím PK jsou zaneseny i základní atributy pro pohyb po síti (zákazy vjezdu, jednosměrnost, mýto atd.). Geodatabáze StreetNet CZE je tak vhodná pro řešení dopravních úloh, navigaci a správu a aktualizace dat dopravních událostí, pro které je nezbytná informace o přesné lokalizaci z pohledu vytváření bariér v dopravním proudu (CEDA, 2012). StreetNet CZE obsahuje 300 000 km dálnic, silnic, místních komunikací (ulic) a účelových komunikací (polních a lesních cest). Takto je pokryto celé území České republiky PK vhodnými pro pohyb motorových vozidel, **cyklistů** a pěších turistů.

GN je narozdíl od ULS určen pro lokalizaci polohy dopravních událostí (dopravních nehod, kongescí,...) polohy uzavírek, objížděk, zvláštního užívání pozemních komunikací stavu sjízdnosti v zimním období. Je využíván v NDIC¹³ (systému JSDI¹⁴), DIC¹⁵ Praha a dalších dopravně-informačních centrech v ČR. GN je určen pro lokalizaci polohy libovolných informací majících vztah k síti pozemních komunikací v celém rozsahu kategorií a tříd stanovených zákonem č.13/1997 Sb. a vyhláškou 104/1997 Sb.

Základním rozdílem mezi sadami GN a ULS je výchozí metoda generování sítě a vedení údajů. ULS je tvořen uzlovými body, mezi nimiž úseky tvoří spojnice. Uzly jsou vedeny

¹³ Národní dopravní informační centrum (NDIC) je centrálním technickým, technologickým, provozním i organizačním pracovištěm Jednotného systému dopravních informací (JSDI, zdroj: MD ČR, 2013)

¹⁴ JSDI je komplexním systémovým prostředím pro sběr, zpracování, sdílení, distribuci a publikaci dopravních informací a dopravních dat o aktuální dopravní situaci a informací o pozemních komunikacích (Zdroj: MD ČR, 2013)

¹⁵ Dopravně-informační centra (DIC) poskytují základní informace o stupních zátěže (intenzita provozu) na vybraných komunikacích, o plánovaných dopravních omezeních, dopravních nehodách a dalších mimořádných situacích (Zdroj: MD ČR, 2013).

v místech, kde dochází k fyzickému rozdělení komunikace (silničního tělesa). Tyto spojnice jsou pojmenovávány podle počátečního a koncového uzlu. Naopak u GN se uzly nevytváří a základním podnětem k rozdělení linie reprezentující komunikaci je oddělení jízdního proudu.

DMÚ 25

DMÚ 25 je chápán jako vektorový topologický model území vznikající z topografické mapy 1 : 25 000. De facto se jedná o obdobu ZABAGED, který je spravován ČÚZK, kdežto DMÚ 25 je pod správou Armády ČR. Tento topologický model území byl tvořen v souřadnicovém systému S-42, nyní je k dispozici i v dalších dvou souřadnicových systémech platných na území České republiky, a to v systému S-JTSK a WGS84. DMÚ 25 narozdíl od ZABAGED nekončí na státní hranici, ale zobrazuje ještě několik kilometrů široké pásmo sousedních států. Hlavními nevýhodami databáze narozdíl od výše uvedených je nezajištění vazeb na oborové databáze, objevuje se také částečná duplicita některých grafických dat nebo se zde vyskytuje vyšší míra generalizace některých objektů, hlavně budov, vodních ploch aj. (Řezník, 2006).

ArcČR 500

Digitální vektorová geografická databáze České republiky ArcČR 500 je vytvořena v podrobnosti měřítka 1 : 500 000. Jejím obsahem jsou přehledné geografické informace o ČR. Data vznikla ve spolupráci CUZK a ArcData Praha, s.r.o. Zdrojem dat pro geografická data ArcČR 500 v 3.0 je databáze Data200. Data tvoří více než 50 prvkových tříd, které se dělí do osmi tematických vrstev. Vstupní data z Data200 mají deklarovanou absolutní přesnost do 100 m. Analýzou ArcČR 500 bylo zjištěno, že relativní polohová přesnost vůči poloze v ZABAGED je s 99% pravděpodobností do 150 m (ArcData, 2012).

ZABAGED - polohopis

Pod pojmem ZABAGED se rozumí digitální geografický model území České republiky, který svou podrobností odpovídá Základní mapě ČR 1:10 000 (ZM 10). Tento geografický model území ČR je veden v souřadnicovém systému Jednotné trigonometrické sítě katastrální (S-JTSK) a výškovém systému baltském – po vyrovnání (Bpv). ZABAGED má charakter GIS integrujícího prostorovou složku vektorové grafiky s topografickými relacemi objektů a složku atributovou obsahující popisy a další kvalitativní či kvantitativní informace o objektech. Polohopisná část (2D) ZABAGED je v současné době tvořena 119 typy základních objektů. Mezi výhody této databáze patří možnost lepší propojitelnosti s oborovými databázemi, přítomnost hranic (obcí, katastrů rozvodů aj.), větší podrobnost zákresu budov, vodních toků apod. Jako nevýhody této databáze můžeme brát menší rozsah sledovaných prvků (většinou "topografických"), užší spektrum napojitelných atributů, zejména právě u objektů komunikací.

U výše uvedených datových sad se jedná o pokrytí téměř výhradně jen pro ČR (příp. SR). Zároveň jsou však k dispozici i datové sady, které jsou vytvářeny jako u DMR globálně mající pokrytí i na území ČR.

NAVSTREETS, Multinet

Mapové podklady společnosti NAVTEQ (Nokia) – NAVSTREETS v České republice mapují na 230,000 km silnic. NAVTEQ poskytuje geografická data i ve formátech ESRI Shapefile, MapInfo aj. Formát ESRI Shapefile je doplněn o relace a atributy dodávané v samostatných XML souborech, kvůli tomu, že samotný Shapefile formát není vhodný pro distribuci relačních dat. RDF je speciální relační datový formát, který umožňuje snadné načítání zdrojových dat do relační databáze.

MultiNet je geografická databáze orientovaná na automobilovou navigaci, řešení dopravně přepravních úloh a routovací úlohy od společnosti TomTom (dříve TeleAtlas). Bezešvá vektorová mapa Evropy se vyznačuje vysokou podrobností a přesností. Struktura databáze, topologicky korektní reprezentace prvků v adekvátní polohové přesnosti, jejich atributy a vzájemné relace umožňují jednoznačně definovaný pohyb po silniční/uliční síti – navigaci a přesný turn-by-turn routing respektující dopravní předpisy. Databáze obsahuje kromě široce atributovaných silničních a uličních úseků vrstvy administrativního členění, funkčního využití a pokryvu území (vodní a lesní plochy, parky, průmyslové plochy, atd.), plochy a centra osídlení.

3.2.2 Požadavky a zdůvodnění výběru

Do této kapitoly jsou zařazeny datové sady, které jsou vytvářeny a ukládány v datových modelech splňující požadavky na síťové modely dopravy (výše uvedené), tj. obsahují uzly a hrany, které jsou propojeny v definované topologické čistotě. Místa a počty vytvářených uzlů a geometrie úseků a jejich atributů jsou však v každé sadě vytvářeny různě - metodika je vždy poplatná účelu, pro který je daný síťový model vytvářen.

Příloha 1 dokumentuje datové sady, které jsou zaměřeny primárně jak na síťové modely pozemních komunikací – ULS a GN, tak i ostatní modely PK, kde datové sady většinou obsahují další vrstvy, které účelově doplňují síťový model PK pro vytváření účelových podkladových map. Další vrstvy obsahují např.: železnice, vodní toky a plochy, sídla, druhy krajinné zeleně, body zájmu atp. K této skupině patří např. DMÚ25, kterou vytváří VGHMÚř Dobruška. DMÚ25 je analogický k produktu ZABAGED, přesto je vytvářen odděleně od ZABAGED a jinou metodikou. DMÚ25 obsahuje o něco větší rozsah objektů a charakteristik terénu a krajiny než ZABAGED. Aktuální technickou dokumentaci k datové sadě DMÚ25 se podařilo získat jen v omezeném rozsahu, byly alespoň využity webové stránky VŠB Ostrava – „Úvodní informace o geografických datech“ (2012). Veškeré další informace o všech kritériích, ale také např. o sémantické náplni datových sad, podrobněji rozepisují Příloha 1 a Příloha 2.

Níže jsou uvedeny základní požadavky na datovou sadu PK. Jedná se především o polohovou přesnost a atributovou naplněnost. Požadovány jsou především základní parametry plus ty, které není možné nějakým způsobem jednoduše vypočítat či určit v prostředí GIS nebo získat procesem vektorizace.

Min. požadavky na mapový podklad:

- Funkční kategorie komunikace:
 - každá linie v síti by měla mít definovanou hodnotu vyjadřující její důležitost v této síti, která je důležitá pro pozdější splnění účelu pro využití v navigační databázi.
- Typ či třída komunikace:
 - každá linie v síti by měla mít definovanou hodnotu typu komunikace, která charakterizuje její hierarchickou příslušnost dle klasifikace PK,
- Geometrie a polohová přesnost:
 - každá linie by měla odpovídat svému reálnému tvaru v reálném světě s požadovanou maximální odchylkou,
 - linie by neměly být generalizovány ani nahrazeny přímými spojnicemi a měly by být vytvořeny v min. měřítku kvůli přesnosti a kompatibilitě s přesnými DMR.
- Další atributové informace:

- každá linie by měla mít informace o jejich fyzických vlastnostech důležité pro pohyb na síti nejen v cyklo dopravě:
 - povrch a stav komunikace,
 - směr dopravního provozu.

Kritérium	Požadovaná min. hodnota	Splňují datové sady
Územní pokrytí	Rozsah území ČR	všechny
Funkční kategorie komunikace (důležitost navigovatelných komunikací)	Min. v rozsahu silnic I-III. Třídy, místní a účelové komunikace a další komunikace vhodné pro cyklo dopravu	DMÚ 25, Multinet, NAVSTREETS, StreetNET
Geometrie a polohová přesnost	Min. 5 m intravilán, 10 m extravilán	Multinet, NAVSTREETS, StreetNET, ZABAGED
Referenční měřítko	min. 1 : 10 000	Multinet, NAVSTREETS, StreetNET, ZABAGED
Aktualizace	1x ročně	Multinet, NAVSTREETS, StreetNET
Datový formát	SHP	všechny
Atributová naplněnost¹⁶	Povrch komunikace, směr dopravního provozu, manévry	Multinet, NAVSTREETS, StreetNET
Dostupnost dat	Min. pro vědecké a výzkumné práce zdarma (důležité pro další analýzy)	DMÚ 25, StreetNET, ZABAGED

Tab. 7. Hodnotící kritéria pro digitální modely silniční sítě (Zdroj: výzkum autora)

Výše uvedené min. požadavky na kvalitu dat může jejich způsobilost doložit některá z výše uvedených ISO norem (viz kapitola 3) podle níž jsou příslušné datové sady vytvářeny.

Hodnocení datových sad

Data Navteq se za ČR nepodařilo získat, stejně jako data TomTom, ta jsou navíc analogická k datům společnosti CEDA. DMÚ25 nesplňuje požadované hodnoty polohové přesnosti z důvodu menšího měřítka, ve kterém byl vytvářen z T-M (topografická mapa) 1 : 25 000. Data ArcČR byla opět vytvářena v naprosto nevyhovujícím měřítku a jsou tak vhodná spíše pro dopravní makromodelování.

Síť pozemních komunikací a jejich atributů v datové sadě ZABAGED je reprezentována třídami prvků (vrstvami) „SilniceDalnice“, „Ulice“, „Cesta“ ve formátu ESRI Shapefile a splňuje polohovou přesnost a min. referenční měřítko, ve kterém byla vytvářena. ZABAGED data však nejsou vhodná pro síťové analýzy – nutné úpravy dat (slučování a napojování jednotlivých vrstev + rozdělování na křižovatkách s tím spojená kontrola prostorových vztahů a topologie) a nejednotná topologie, kde vrstvy Silnice-dálnice a ulice mají překryvy v jednotlivých vrstvách (silnice v intravilánu = ulice → problém pro síťové analýzy). Rovinný charakter databáze navíc neumožňuje reprezentaci víceúrovňových uzlů, zákazů otáčení a dalších manévrů, kde data ZABAGED nerovinný model ani v oblasti zákazů otáčení (u-turn) nesplňují. I vysoce sofistikovaná a polohově přesná a atributově bohatá datová sada ZABAGED – polohopis proto nevyhovuje požadavkům na datovou sadu vhodnou pro účely této práce. Důvod je ten, že tato datová sada není tvořena dle specifikací GDF pro navigační data, vhodné pro síťové analýzy, které musí svým datovým modelem, topologií, obsahem i rozsahem dostát stále se zvyšujícím požadavkům širokého spektra uživatelů a umožnit díky podrobné silniční a uliční síti takovým způsobem informovat uživatele, aby aplikace na ní vystavené mohly řídiče

¹⁶ Atributovou naplněnost zobrazuje Příloha 2.

vést po této síti správným a korektním způsobem v souladu s dopravními aj. předpisy. To je dáno genezí, datovou strukturou a jejich účelem využití jakožto Základní bázi geografických dat ČR, tedy dat především popisných. Datová sada dále postrádá atribut klasifikace vycházející z důležitosti navigovatelných komunikací a atribut fyzického typu a stavu silnice (povrch).

StreetNET je datový model optimalizovaný pro síťové analytické úlohy:

- geometrická složka: jednotná topologická síť, geometrická reprezentace komunikací optimalizovaná pro navigační úlohy (duály, kolektory, větve, kruhové objezdy, tunely, brody, přívozy,...),
- atributová složka: navigační atributy (jednosměrnost, manévry, zákazy vjezdu či omezení typu dle vozidel, mýtné, tahy apod...).

Zároveň také splňuje veškeré další požadavky na polohovou přesnost a referenční měřítko

Z výše uvedeného vyplývá, že i přes širokou míru uplatnění napříč subjekty veřejné správy nejsou datové sady DMÚ 25 ani polohopis ZABAGED ve své současné podobě pro cíle práce, tj. určení vztahu morfometrie a síťových analýz, využitelné. Pro další účely práce byl proto jako nejvhodnější model silniční sítě vyhodnocena datová sada StreetNET, a proto byla v následujících analýzách pracováno výhradně s ní.

4 VZTAH MORFOMETRIE A SÍŤOVÝCH ANALÝZ

Jak již z rešeršní části vyplývá, v práci bylo potřeba řešit několik zásadních výzkumných otázek, které zatím doposud nebyly řešeny, byly řešeny pouze částečně nebo byly řešeny nepřesným způsobem. Generálním otázkou je, zdali vůbec dokážou GIS nějakým způsobem vyřešit vztah mezi DMR a síťovými analýzami, především v oblasti dopravních úloh. Už z předchozí rešeršní části je patrné, že tento vztah byl alespoň částečně potvrzen již dříve. Je však potřeba v tomto ohledu říci, že přesnost předešlých metodik byla většinou velmi rozdílná a daná především účelem, zaměřením, rozsahem, vstupními daty, úrovní automatizace a výzkumným územím daných prací. Hlavní problémy plynoucí ze stávající používaných způsobů vznikají především při výpočtech podélného sklonu a křivosti jednotlivých segmentů grafu (silniční sítě).

Manuální ohodnocení hran silniční sítě dle vybraných parametrů sice vykazuje reálné výsledky, ale postup je velice zdoluhavý, náročný a uživatelsky nepraktický a pro využití pro území např. celého státu téměř nemožný. Jedním z cílů práce bylo proto vytvořit funkční metodiku a ověřit ji pomocí algoritmu, který všechny kroky předchozího postupu bude provádět automaticky a na základě vstupních podmínek přímo vygeneruje pro každý úsek silnice záznam s průměrným sklonem pro oba jízdní směry a křivostí, a dokáže tak zohlednit i morfometrické parametry prvního i druhého řádu. Zároveň nakonec dokáže vytvořené pole převést dle převodní rovnice na rychlost a čas potřebný k projetí daného úseku. K tomu bylo potřeba nejprve definovat, jaké nástroje byly pro vytvoření metodiky, zpracování dat terénního průzkumu, dalších výstupů a samotné potvrzení funkčnosti metodiky, využity.

4.1 Použitý SW

Samotné zpracování obrázků ilustrujících jednotlivá výpočtová schémata bylo realizováno za pomoci SW CorelDraw X6 od společnosti Corel Corporation. Zpracování dat z terénního průzkumu bylo realizováno za pomoci SW BaseCamp od společnosti Garmin, rychlostní matice a další tabulky pomocí modulu Excel, resp. schémata Visio od společnosti Microsoft. Ověření jednotlivých výpočtů sklonitosti a křivosti proběhlo v SW Matlab od společnosti MathWorks. Regresní analýza a určení převodních rovnic probíhalo v prostředí SPSS Statistics 17.0 od společnosti IBM.

GIS software

Samotný nástroj byl určen pro software ArcGIS 10. x Desktop od společnosti ESRI. Skript pro nově vytvořený toolbox byl napsán v programovacím jazyce Python (konkrétně ve verzi Python 2.6.5) v prostředí Python IDLE nad platformou Microsoft Windows.

Hlavním důvodem po vybrání softwaru ArcGIS je jeho všeobecné rozšíření a časté používání v naprosté většině institucí napříč obory – od akademické sféry (využíván a vyučován na všech předních univerzitách), přes jednotlivé složky IZS, státní správu (ministerstva, státní instituce, kraje a úřady jako ČHMI, CENIA, AOPK, ČSÚ, ČUZK, atd.) a samosprávu (veškeré krajské úřady, mnohé obecní úřady,...) až po soukromý sektor a zároveň také institucemi či společnostmi zodpovědné za správu Georeferenční sítě PK (Silniční databanka Ostrava) či dalších pasportně-evidenčních a navigačních datových sad (CEDA, TomTom,...).

Programovací jazyk

Python je moderní skriptovací programovací jazyk. Díky svým základním vlastnostem je velice často používaný a oblíbený. Jedná se rovněž i o hlavní podporovaný skriptovací jazyk v ArcGIS for Desktop, jelikož počínaje verzí 9.0 byl zaveden jako skriptovací jazyk do těchto produktů. Pro zpracování geografických dat a řešení prostorových úloh (tzv. geoprocessing) je v ArcGIS k dispozici několik jazyků, nicméně Python je od verze 10.0 Python označován jako základní. To se projevuje zejména v míře podpory jednotlivých jazyků – pro práci s Pythonem je k dispozici tzv. Python okno přímo v aplikaci ArcMap, knihovna Arcpy, či široká nápověda v rámci nápovědy k produktu ArcGIS for Desktop (Bartoš, 2011).

4.2 Preprocessing

Jako vstupní data byl pro potřeby práce vybrán DMR-4G s přesností 1 m (viz kap. 3.1.3), který představuje digitální reprezentaci reliéfu zemského povrchu a digitální model silniční sítě StreetNET od společnosti CEDA (viz kap. 3.2), který představuje síť pozemních komunikací. Byly zvoleny nejběžnější a jedny z nejkvalitnějších datových sad v ČR používaných pro účely určování nadmořských výšek terénu, resp. navigačních potřeb.

Data silniční sítě díky jejich formátu, datovému modelu a metodickou tvorbou dle norem nebylo třeba nijak dále upravovat ani kontrolovat. Pro potřeby práce tak bylo především třeba připravit data výškopisu.

Na základě vybraných dat, která neúplně pokrývají zpracovávanou oblast (body z LIDARu) bylo nutné „doplnění“ oblasti na kompletní reprezentaci povrchu za využití interpolačních metod. Interpolační algoritmy se snaží na základě svého matematického základu a zadaných vstupních parametrů (které interpolaci ovlivňují) predikovat chování reálného terénu (Štych a kol., 2008). Zde je nutné si uvědomit, že interpolační algoritmy si chování terénu mezi vstupními body „vymýšlí“. Kvalita výstupního DMR se tedy odvíjí nejen od kvality vstupních dat (přesnost, hustota), ale také od vhodně zvolené interpolační metody včetně řídicích parametrů.



Obr. 15. Schéma přípravy vstupních dat DMR (vysvětlivky viz Příloha 15, Zdroj: výzkum autora)

Digitální model terénu bylo nejprve nutné upravit do použitelného rastrového formátu za pomoci nástrojů GIS a z bodové vrstvy vytvořit spojitý povrch za pomoci interpolačních metod. Zde byla použita metoda Topo to Raster¹⁷, kterou např. ve své práci využil i Louthan (2010) z důvodu o něco větší „vyhlazenosti“ komunikační sítě (např. absence výskytu hran apod.). Vloženy byly bodové vrstvy všech 4 mapových listů (získaných od CUZK) s využitím velikosti

¹⁷ Topo to Raster je podle Uršuláka (2010) interpolační metoda vytvořená speciálně pro generování hydrologicky korektních DMR a je designována/navržena/určena k použití běžně dostupných vstupních dat. Je optimalizována k výpočetní efektivnosti lokálních interpolačních metod, jako je IDW ale bez ztráty návaznosti povrchu globálních interpolačních metod, jako je Spline a Kriging. Je to vlastně diskretizovaná metoda spline plátování, u které je umožněno, aby výsledný povrch kopíroval náhlé změny terénu jako vodní toky a hřbetnice.

pixelu na 2 m. Toto rozlišení je důležité pro získání přesnějších výsledků a bylo zvoleno na základě min. šířky návrhové kategorie pozemních komunikací nejnižšího řádu S4 (šířka 4 m) podle ČSN 73 61 01 tak, aby bylo možné silničnímu úseku (geometrii) přiřadit min. jeden střed pixelu z každého řádku i sloupce gridu DMR při zvolení nulového horizontálního sklonu a křivosti. Zvolení nižší hodnoty prostorového rozlišení by nebylo reálné a ani přesné s ohledem na rozlišení vstupní mřížky bodového mračna. Typ vstupních dat byl nastaven jako bodová vrstva s hodnotou nadmořské výšky Z.

4.3 Určení podélného sklonu

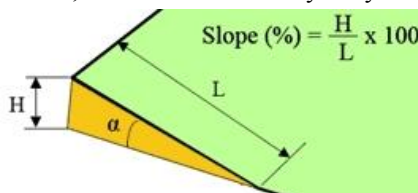
Exaktní vyjádření výškového grafu komunikací je základem dalšího postupu. Způsobů jak číselně popsat určité charakteristiky tvaru komunikace je více, ne všechny jsou však vhodné pro vyjádření jejich složitosti a tvaru při využití v síťových analýzách.

Nejlepším způsobem je pro výpočet podélného sklonu komunikace využít matematických metod pro vyšetřování průběhu funkce, jak již bylo naznačeno výše, a modelovat průběh PK pomocí výškového grafu - profilu, který sice nereprezentuje geometrický průběh linie, ale dokáže nejuvěrněji ilustrovat zvolený postup na základě lokalizace jednotlivých koncových i lomových bodů a jejich incidenci pro detekci krizových (stacionárních či inflexních) bodů na linii, které se v tomto případě, výpočtu sklonu, shodují s body stacionárními.

Základní vzorec pro výpočet podélného sklonu, který vychází z normy ČSN 73 61 01 (VUT, 2012):

$$s = \frac{H}{L} * 100 = \frac{([VYS_K] - [VYS_P])}{L} * 100 [\%]$$

kde L – prostorová délka úseku, VYS_P – nadmořská výška počátečního uzlu úseku, VYS_K – nadmořská výška koncového uzlu úseku, H – rozdíl nadmořských výšek.



Obr. 16. Výpočet sklonu (Zdroj: VUT, 2012 + úpravy autora)

Ani tento vzorec po odstranění absolutní hodnoty (viz Obr. 16), tj. vymezení úseků s kladnou a zápornou hodnotou, není přesný. Problém při určení podélného sklonu komunikace vychází především z délky úseků digitálních modelů silniční sítě, jejich lomení a systému jejich napojování (viz kap. 3.2).

Téměř většina digitálních modelů silniční sítě má jednotlivé úseky dělené na základě jejich průniku (křižovatek – planární uzly). To však může způsobit problémy při určování průměrného sklonu jednotlivých úseků, které jsou většinou velmi nesourodé a morfometrii terénu přesně nekopírují takovým způsobem, aby mohl být průměrný sklon daného úseku přesně vypočítán dle výše uvedeného vzorce. Výpočet je proto třeba zpřesnit dle popsaných problémů takovým způsobem, aby přesněji odpovídal realitě a vztah k DMR zde byl přesněji vyjádřen.

Např. pro Tázlara (2012) vzhledem k velmi krátké délce jednotlivých linií (v průměru cca 110 m) a spíše rovinnému charakteru území města Olomouce tento jev nebyl významným problémem. V jiných případech by však zpřesňující metodou mohlo být další „rozsekání“ úseků na několik dílčích linií, kde by již mohla být vypočtena hodnota sklonu v celé délce dle

metodiky Hudečka (2009), dle výše uvedeného výpočtu podélného sklonu nebo příp. dle váženého průměru jednotlivých segmentů linie.

Dalším problémem také je, že většina SW GIS počítá implicitně pouze s délkou segmentu v rovině (průřezu na zemskou plochu), nikoliv v prostoru, jak by dle norem ČSN i metodiky Hudečka mělo být správně. Pro navrženou novou metodiku proto bylo nutné zohlednit výpočet reálné délky segmentů (např. níže pro L_1) po povrchu, ten bylo možné vypočítat pomocí Pythagorovy věty:

$$L_1 = \sqrt{\Delta h^2 + l^2},$$

kde Δh je rozdíl nadmořských výšek krajních bodů linie a l je vzdálenost linie ve dvourozměrném prostředí (níže na Obr. 17 by l_1 i $l_2 = 6$). Reálná hodnota po povrchu je pro:

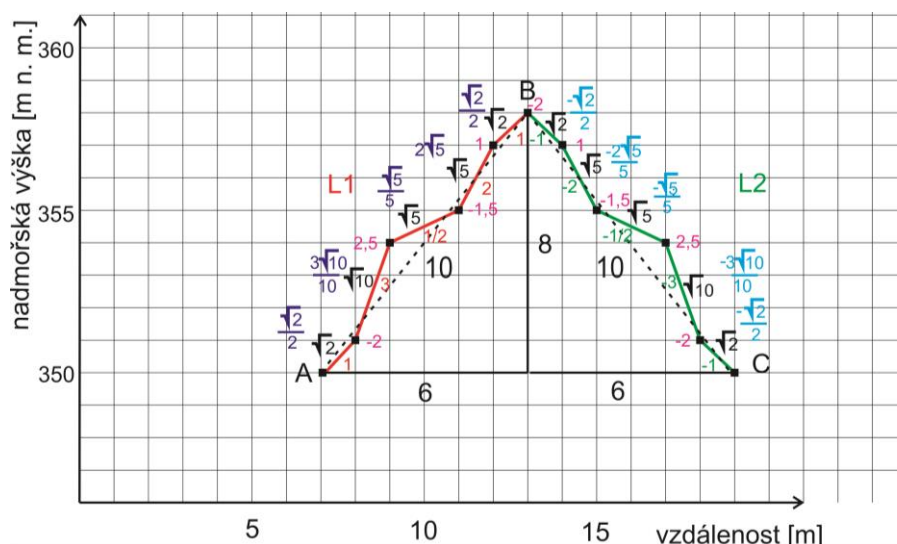
$$L_1, L_2 = \sqrt{6^2 + 8^2} = 10.$$

Pro doložení rozdílnosti délky linií ve 2D (polohovém) a 3D (prostorovém) rozměru byla vypočítána délka všech úseků v zájmové lokalitě, jak dokumentuje následující Tab. 8:

Délka linií ve 2D	Délka linií ve 3D (po povrchu)
105259,39 m	105679,76 m

Tab. 8. Velikost délky linií zkoumaného území po povrchu a ve 2D rozměru (Zdroj: výzkum autora)

V procentuálním vyjádření to dělá rozdíl zhruba $+ 0,0039 = + 0,39 \%$ v absolutních hodnotách je to zhruba 400 délkových metrů, což není velké číslo, nicméně ani tento rozdíl by neměl být zanedbáván a do výsledné metodiky zohledněn. Výše čísla je dána především velmi nízkými hodnotami sklonu, které jsou typické pro silniční síť. Zároveň je možné toto číslo chápat jako průměrnou absolutní hodnotu sklonu všech úseků zkoumaného území (o něm více v kapitole 4.6.1). V tomto výpočtu navíc není nutné řešit směr orientace linie, na kterém tento vztah nezávisí.



Obr. 17. Linie s jednotlivými segmenty a lomovými body (hodnoty sklonu segmentů pro jednotlivé linie ve 2D/3D rozměru, černě 3D délky segmentů či průsečíku počátečního a koncového bodu, Zdroj: výzkum autora)

Hodnoty sklonů na Obr. 17 pro jednotlivé segmenty byly vypočteny na základě jak polohové (zelené a červené hodnoty), tak i povrchové (fialové či modré hodnoty) vzdálenosti 2 lomových bodů a slouží pouze jakožto mezivýsledek pro další metodiky a demonstraci odlišnosti jednotlivých výsledků.

Pro ilustraci výpočtu sklonu byly dvě linie zobrazeny na výškovém vzdálenostním grafu, tj. byla určena závislost délky linie a nadmořské výšky. Pokud se pohybujeme z bodu A přes bod do bodu C po 2 liniích, které jsou odděleny bodem B (viz Obr. 17) a které jsou tvořeny několika segmenty, je možné vypočítat hodnoty sklonů v určeném směru $A \rightarrow C$ pro linie L_1 a L_2 a zároveň pro celkovou trasu A-C na základě 3 základních metodik ve variantách s délkou segmentu v průmětu na zemský povrch (a) nebo s reálnou délkou segmentu po povrchu (b):

Hudeček (2009) – absolutní hodnota úseku:

$$\begin{aligned} \text{a) } s_{L1} &= \frac{|350 - 358|}{6} = \frac{8}{6} = 1,33 \% , & \text{b) } \frac{8}{10} &= 0,8 \% \\ \text{a) } s_{L2} &= \frac{|358 - 350|}{6} = \frac{8}{6} = 1,33 \% , & \text{b) } \frac{8}{10} &= 0,8 \% \\ \text{a) } s_{AC} &= \frac{|350 - 350|}{12} = \frac{0}{12} = 0 \% , & \text{b) } \frac{0}{20} &= 0 \% \end{aligned}$$

Metodika ČSN 73 61 01 (bez absolutní hodnoty):

$$\begin{aligned} \text{a) } s_{L1} &= \frac{(358 - 350)}{6} = \frac{8}{6} = 1,33 \% , & \text{b) } \frac{8}{10} &= 0,8 \% \\ \text{a) } s_{L2} &= \frac{(350 - 358)}{6} = \frac{-8}{6} = -1,33 \% , & \text{b) } \frac{-8}{10} &= -0,8 \% \\ \text{a) } s_{AC} &= \frac{(350 - 350)}{12} = \frac{0}{12} = 0 \% , & \text{b) } \frac{0}{20} &= 0 \% \end{aligned}$$

Metodika absolutního průměru sklonu segmentů:

$$\begin{aligned} \text{a) } s_{L1} &= \frac{|1 + 3 + \frac{1}{2} + 2 + 1|}{5} = \frac{15}{5} = 1,5 \% , & \text{b) } \frac{|\frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{3}{\sqrt{10}} + \frac{1}{\sqrt{5}} + \frac{2}{\sqrt{5}} + \frac{1}{\sqrt{2}}|}{5} &= 0,74 \% \\ \text{a) } s_{L2} &= \frac{|-1 - 3 - \frac{1}{2} - 2 - 1|}{5} = \frac{15}{5} = 1,5 \% , & \text{b) } \frac{|-\frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{3}{\sqrt{10}} - \frac{1}{\sqrt{5}} - \frac{2}{\sqrt{5}} - \frac{1}{\sqrt{2}}|}{5} &= 0,74 \% \\ \text{a) } s_{AC} &= \frac{|1 + 3 + \frac{1}{2} + 2 + 1 - 1 - 3 - \frac{1}{2} - 2 - 1|}{10} = \frac{0}{12} = 0 \% , \\ \text{b) } & \frac{|\frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{3}{\sqrt{10}} + \frac{1}{\sqrt{5}} + \frac{2}{\sqrt{5}} + \frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{3}{\sqrt{10}} - \frac{1}{\sqrt{5}} - \frac{2}{\sqrt{5}} - \frac{1}{\sqrt{2}}|}{5} = 0 \% \end{aligned}$$

Metodika váženého průměru délky segmentů (a):

$$\begin{aligned} s_{L1} &= \sum_{i=1}^n \frac{l_i \cdot s_i}{l_i} = \frac{1 * \sqrt{2} + 3 * \sqrt{10} + \frac{1}{2} * \sqrt{5} + 2 * \sqrt{5} + 1 * \sqrt{2}}{2\sqrt{2} + 2\sqrt{5} + \sqrt{10}} = \\ &= \frac{1,41 + 9,48 + 1,11 + 4,47 + 1,41}{2,82 + 4,47 + 3,16} = \frac{17,88}{10,45} = 1,71 \% \\ s_{L2} &= \sum_{i=1}^n \frac{l_i \cdot s_i}{l_i} = \frac{-1 * \sqrt{2} - 2 * \sqrt{5} - \frac{1}{2} * \sqrt{5} - 3 * \sqrt{10} - 1 * \sqrt{2}}{2\sqrt{2} + 2\sqrt{5} + \sqrt{10}} = \\ &= \frac{-1,41 - 4,47 - 1,11 - 9,48 - 1,41}{2,82 + 4,47 + 3,16} = \frac{-17,88}{10,45} = -1,71 \% \\ s_{AC} &= \frac{(1 * \sqrt{2} + 2 * \sqrt{5} + \frac{1}{2} * \sqrt{5} + 3 * \sqrt{10} + 1 * \sqrt{2}) + (-1 * \sqrt{2} - 2 * \sqrt{5} - \frac{1}{2} * \sqrt{5} - 3 * \sqrt{10} - 1 * \sqrt{2})}{2\sqrt{2} + 2\sqrt{5} + \sqrt{10} + 2\sqrt{2} + 2\sqrt{5} + \sqrt{10}} \\ &= \frac{17,88 - 17,88}{20,9} = \frac{0}{20,9} = 0 \% \end{aligned}$$

Navržená metodika váženého průměru reálné délky segmentů po povrchu (b):

$$S_{L_2} = \sum_{i=1}^n \frac{l_i \cdot s_i}{l_i} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2}} * \sqrt{2} + \frac{3}{\sqrt{10}} * \sqrt{10} + \frac{1}{\sqrt{5}} * \sqrt{5} + \frac{2}{\sqrt{5}} * \sqrt{5} + \frac{1}{\sqrt{2}} * \sqrt{2}}{2\sqrt{2} + 2\sqrt{5} + \sqrt{10}} =$$

$$= \frac{1 + 3 + 1 + 2 + 1}{2,82 + 4,47 + 3,16} = \frac{8}{10,45} = 0,77 \%$$

$$S_{L_2} = \sum_{i=1}^n \frac{l_i \cdot s_i}{l_i} = \frac{-\frac{1}{\sqrt{2}} * \sqrt{2} - \frac{3}{\sqrt{10}} * \sqrt{10} - \frac{1}{\sqrt{5}} * \sqrt{5} - \frac{2}{\sqrt{5}} * \sqrt{5} - \frac{1}{\sqrt{2}} * \sqrt{2}}{2\sqrt{2} + 2\sqrt{5} + \sqrt{10}} =$$

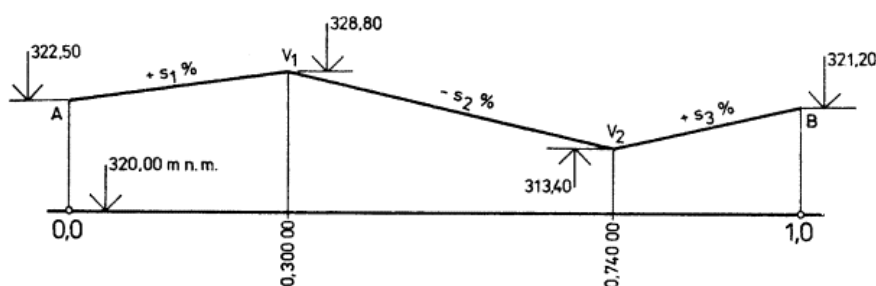
$$= \frac{-1 - 3 - 1 - 2 - 1}{2,82 + 4,47 + 3,16} = \frac{-8}{10,45} = -0,77 \%$$

$$S_{AC} = \frac{(\frac{1}{\sqrt{2}} * \sqrt{2} + \frac{3}{\sqrt{10}} * \sqrt{10} + \frac{1}{\sqrt{5}} * \sqrt{5} + \frac{2}{\sqrt{5}} * \sqrt{5} + \frac{1}{\sqrt{2}} * \sqrt{2}) + (-\frac{1}{\sqrt{2}} * \sqrt{2} - \frac{3}{\sqrt{10}} * \sqrt{10} - \frac{1}{\sqrt{5}} * \sqrt{5} - \frac{2}{\sqrt{5}} * \sqrt{5} - \frac{1}{\sqrt{2}} * \sqrt{2})}{2\sqrt{2} + 2\sqrt{5} + \sqrt{10} + 2\sqrt{2} + 2\sqrt{5} + \sqrt{10}} =$$

$$= \frac{8 - 8}{20,9} = \frac{0}{20,9} = 0 \%$$

Pozn.: Ověření výpočtů proběhlo v SW Matlab.

Z těchto hodnot je patrná odlišná hodnota sklonu při využití váženého průměru jednotlivých segmentů. Při využití váženého průměru, dochází totiž k přesnější aproximaci pomocí lomových bodů, které dokáží lépe modelovat celkovou velikost sklonu. Jedná se tedy o aproximaci maximální. I tato metodika však pro svůj přesný výpočet potřebuje další optimalizaci v podobě detekce kritických bodů. Nedokáže totiž vypočítat přesně hodnotu průměrného sklonu při výskytu lokálních nebo globálních maxim (v podobě bodu B) v průběhu linie. Toto demonstruje výpočet sklonu celkové trasy A-C, kde byla hodnota určena na 0 %, ačkoliv reálný průměrný sklon dle absolutní hodnoty je samozřejmě odlišný (vyšší). Využití této přesné metodiky vyžaduje nalezení kritických bodů (inflexe či stacionární), které výpočet průměrného sklonu zpřesní a kde dochází ke změně funkčních hodnot podélného sklonu ze záporných do hodnot kladných (příp. obráceně) jako v případě bodů v1 a v2 na Obr. 18. Jejich výpočet je možný, pokud bude nalezena takové místo na segmentu, kde hodnota první derivace bude rovna nule. To platí v případě, že funkce je spojitá na celém svém definičním oboru. Nakonec bude nutné proto linie v těchto bodech rozdělit.



Obr. 18. Rozdělení linie ve stacionárních bodech (Zdroj: VUT, 2012)

Hledání kritických bodů v síťovém grafu je však limitováno několika faktory. Jak už bylo řečeno výše, graf se skládá z uzlů a hran a většina SW GIS je schopna přiřadit či získat informaci o nadmořské výšce a souřadnicích jen pro lomové body samotné, tj. nespojitě.

Při hledání stacionárních bodů tak bude nutno soustředit se především na ně. Nebude sice dosaženo nejpresnějšího výsledku v případě, že lokální/globální maxima budou ležet zrovna mezi nimi (na spojnici), ale jedná se o nejpresnější a nejefektivnější metodiku pro jejich získání. Nejprve tak bude u každého segmentu grafu nutné prohledat všechny lomové body každé linie a získat informace o jejich nadmořské výšce. Ta bude získána na základě podkladového rastru

DMR-4G o rozlišení 2 m, kde každý z bodů náleží právě jedné hodnotě st-ředu buňky gridu DMR a každou hodnotu je možné těmto bodům přiřadit. V následujícím kroku poté bude potřeba prohledat a porovnat jednotlivé hodnoty nadmořských výšek a nadmořských výšek počátečního a koncového bodu segmentu. V případě že některá z hodnot bude ležet mimo tento interval + stanovenou hraniční mez, bude následovat vyhodnocení, zdali je tento bod natolik významný, že by mělo dojít k rozdělení linie na dva úseky.

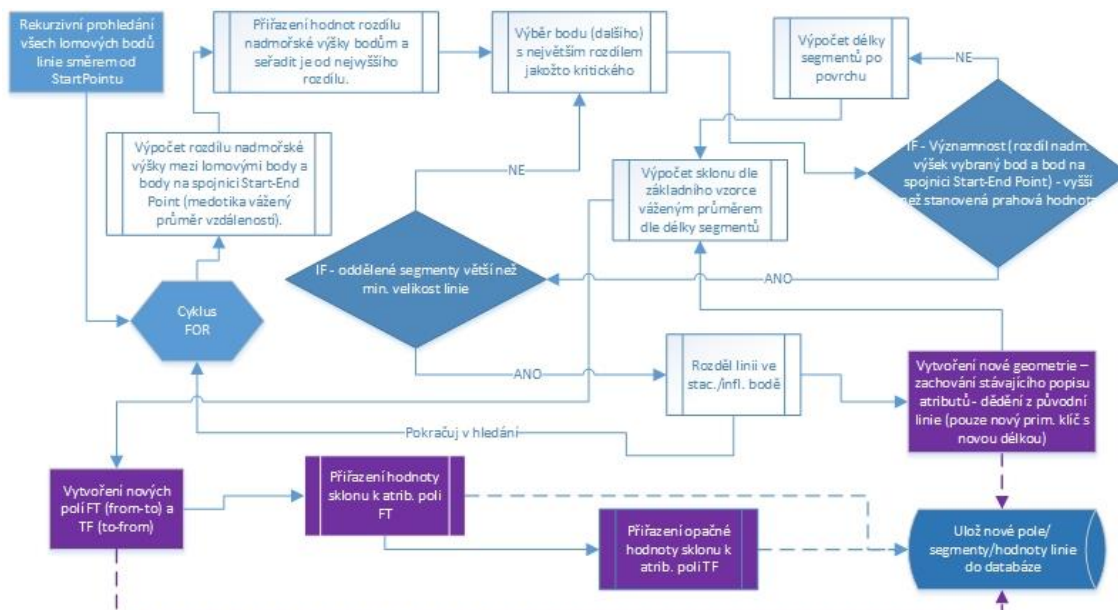
Pokud budou splněny všechny předchozí podmínky, dojde k rozdělení linie na 2 úseky a prohledávání u nich bude rekurzivně pokračovat, dokud nebudou podmínky splněny a prohledávání bude ukončeno. Linie tak již nebudou obsahovat žádná významná globální/lokální maxima.

Velmi důležité je následně, aby nově vytvořené úseky linií přebraly primární klíč (ID) a další atributy své původní linie, a došlo tak k zachování veškerých dalších informací o linii kvůli pozdějšímu využití pro další parametry síťových modelů jako je např. povrch komunikace.

V momentě, kdy již došlo k situaci, že graf sestává pouze z jasně orientovaných linií, resp. máme zaručeno, že každá z nově vytvořených linií již nebude obsahovat významné kritické (stacionární) body, je možné ji přiřadit hodnotu kladného či záporného sklonu, jelikož již linie bude obsahovat pouze segmenty s klesajícími či rostoucími hodnotami nadmořské výšky, příp. se zanedbatelnými hodnotami indexů segmentů opačného směru – čili bude se jednat o směr výhradně z/do „kopce“. V tuto chvíli již bude možné přistoupit k výpočtu průměrného sklonu na základě váženého průměru, který zohledňuje delší segmenty a přiřazuje jim vyšší váhu při výpočtu, proto výpočet bude probíhat na základě využití váženého průměru, kde vahou bude právě délka segmentu. Po diskuzi byla nakonec zvolena varianta váženého průměru reálné délky segmentů po povrchu jako nejpřesnější:

$$s_i = \sum_{i=1}^n \frac{l_i \cdot s_i}{l_i} \Rightarrow \sum_{i=1}^n \frac{s_1 \cdot l_1 + s_2 \cdot l_2 + s_n \cdot l_n}{l_1 + l_2 + l_n}$$

Otázkou však stále zůstává, jakým způsobem detekovat kritické body a kde je hranice, kdy je již možné lomový bod za kritický považovat a kdy nikoliv (více v kap. 4.3.1).



Obr. 19. Schéma výpočtu podélného sklonu (vysvětlivky viz Příloha 15, Zdroj: výzkum autora)

4.3.1 Určení kritických bodů

Při modelování výškového profilu je nutno detekovat tzv. kritické body (Critical points). Cílem je snaha, o co nejlepší aproximaci výškového tvaru linie detekcí takových bodů, aby byla zachována geometrie linie a její výšková přesnost.

Kritické body lze snadno detekovat s využitím geometrických parametrů (Bayer, 2008):

- stacionární body
- inflexní body,
- body s maximální křivostí,
- body s minimální křivostí.

Tyto body by měly být významné pro modelaci pohybu na síti PK. Tzn., je nutné určit jejich celkovou významnost z hlediska možnosti rozdělení linie v jejich místě. Kritické body jsou detekovány generalizačními algoritmy řadou různých technik (Bayer, 2008). Algoritmy jsou děleny do 3 skupin, jakým způsobem je možné je detekovat (Zhilin, 2007):

Sekvenční algoritmy

Postupně procházejí jednotlivé body linie s cílem nalezení nejdelšího možného segmentu splňujícího geometrickou podmínku. Body podél něho splňující geometrickou podmínku, jsou odstraněny. Koncový bod nejdelšího segmentu je kritickým bodem.

Iterativní algoritmy

Rekurzivní dělení polyline na menší segmenty na základě geometrické podmínky, kdy je při každém dalším rekurzivním dělení nalezen jeden kritický bod.

Algoritmy založené na funkčních kritériích

V každém lomovém bodě je spočtena křivost a jako kritické body jsou vyhodnoceny ty s absolutní hodnotou křivosti (lokálně). Všechny tyto způsoby jsou potenciálně možné, proto bylo potřeba definovat některé podmínky, které nám mohou lépe pomoci při rozhodnutí, který z nich vybrat.

Definice podmínek

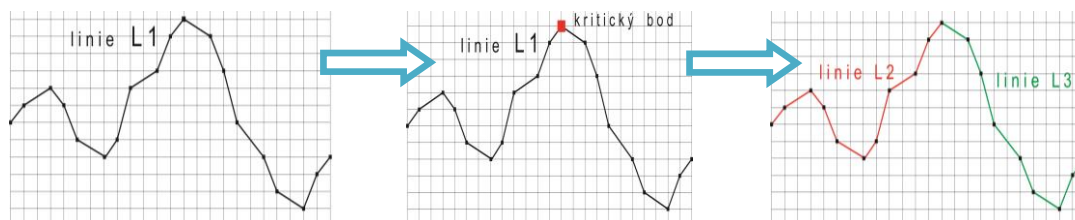
Na začátku je definována linie a její lomení (lomená čára L1) rozdělená na několik segmentů lomovými body, která by pomocí těchto technik měla být rozdělena, pokud tak bude určeno za vhodné. Výsledkem by měly být linie, které budou výškově nezjednodušené lomené čáry L2, L3, L4 až Ln, které budou na svých nově určených koncových a počátečních bodech na sebe navazovat a tvořit v celku linii L1 (celý tento postup je zobrazen na Obr. 20). Počáteční a koncová místa nově rozdělených linií budou tvořena kritickými body, kde bude docházet k signifikantní změně sklonitosti z hodnoty záporné na hodnotu kladnou (příp. obráceně), tedy v závislosti na vypočtených hodnotách digitálního modelu terénu. Pro výpočet sklonitosti pak budou výsledné linie L2, L3 až Ln aproximovat počáteční linii L1.

V případě že nebude žádný bod vyhodnocen jako kritický (inflexní) bude se $L1 = L2$, avšak pro výpočet celkové sklonitosti bude původní linie L1 tvořena novou o segmentech l_1 až l_n , na základě jejichž vážené délky bude výsledný výpočet probíhat.

V tomto procesu existuje několik dalších důležitých podmínek, které musí být předem definovány a vstupní i výstupní linie je musí splňovat:

- Počet lomových (mezilehlých) bodů u L2 až Ln \leq počet lomových (mezilehlých) bodů u L1.
- Součet celkového počtu vrcholů u L1 \leq součtu celkového počtu vrcholů u L2 až Ln.
- Lomové body nejsou počáteční ani koncové body L1.

- Linie L1 je tvořena minimálně dvěma vrcholy.
- Žádné dva segmenty linie se nesmějí protínat ve stejné vertikální úrovni linie.
- Žádný segment L2 až Ln se nesmí shodovat se segmentem jiného prvku L1 ani Ln.
- Žádné dva lomové, koncové ani počáteční body se nesmějí shodovat ve svých prostorových (zeměpisných) souřadnicích (eliminace smyček na silniční síti).



Obr. 20. Základní popis algoritmu při rozdělení linie (Zdroj: výzkum autora)

Kritické body nemusí být jen body stacionární (oblasti maxim – viz Obr. 21), ale také inflexní, jak dokazuje linie se stále stejným indexem sklonu, ale s velkou změnou křivosti – viz Obr. 24. I takovýto bod se poté může stát kritickým a pro modelování pohybu na PK velmi důležitým.



Obr. 21. Linie s lomovými body a mezilehlými lomenými čarami s DMR v prostředí GIS (barevně odlišeny nadmořské výšky, Zdroj: výzkum autora)

V našem případě bude proto potřeba využít postupy aplikované v tzv. globálních rekurzivních algoritmech, jak již vyplynulo z výše nastíněných podmínek, metodiky výpočtu sklonu a nutnosti procházet celé linie (každý bod) rekurzivně (každou další nově vytvořenou linií). Níže jsou uvedeny druhy generalizačních algoritmů (Bayer, 2008), které vyhovují těmto podmínkám a které budou využity v této metodice.

Metody detekce:

- Globální zpracování:
 - Detekce kritických bodů ze všech vrcholů.
- Rekurzivní zpracování:
 - Dělení polyline na kratší segmenty.

Na základě definice podmínek pro identifikaci kritických bodů byla také vyzkoušena celá řada dalších postupů, od těch nejjednodušších s přímým výpočtem vzdáleností kritických bodů při jednom průchodu či lokálním zpracováním segmentů s přiřazenou hodnotou sklonu, která se v průběhu orientace mění podle určité funkce. To by ovšem znamenalo počítat pro každou linii novou funkci danou posloupností jednotlivých sklonů či extrahovanou přímo z nadmořských výšek prokládáním každé linie polynomy o n-řádech. Problém ale je, že téměř každý úsek je unikátní svým průběhem (nestejně dlouhý) a sklonem a každý by vyžadoval najít co nejoptimálnější proložení polynomy odlišných řádů, nejlépe samozřejmě automatizovaně.

Toto však bylo shledáno jako nerealizovatelné v rámci možností této práce a navíc by tento postup enormně zatěžoval výpočetní stroj, což by znemožňovalo jeho pozdější využití pro rozsáhlejší území s několika tisíci až miliony segmentů. Zároveň je také nutno podotknout, že by tato metodika ani nemohla dosahovat přesných výsledků, jelikož by docházelo ke zhlazení linie tvořené lomovými body, které navíc vyžadují na celém definičním oboru existenci první derivace, která ale v nich být definována nemůže. V těchto místech by tak docházelo k největším odchylkám od reálných hodnot, i proto byla zachována metodika výpočtu sklonu podle váženého průměru vzdáleností reálné délky jednotlivých segmentů díky maximální aproximaci i v lomových bodech.

Stejně tak by tomu bylo v případě využití známých polynomiálních modelů pro lokálně definovatelné reprezentace povrchu díky výpočtu jeho křivosti, jak ve své práci zmiňují Schmidt a Evans (2003).

Pro vyhledávání kritických bodů tak bylo využito metod kartografických generalizačních algoritmů. Vzhledem k využití prahové hodnoty a potenciálnímu výskytu více kritických bodů na jedné linii je bylo nutné prohledávat **rekurzivním** zpracováním a celý proces rekurze ukončit podmínkou, kdy bude vnoření do jednotlivých nově rozdělených linií ukončeno až za splnění max. velikosti prahové hodnoty.

Tomuto postupu odpovídala možnost využít globální generalizační algoritmy používané pro polohové zjednodušení liniových prvků, jak uvádí McMaster (1987) cit. v Bayer (2008):

- Douglas-Peucker,
- Min-Max,
- Whyatt,
- Bend Simplify.

Většina těchto algoritmů pracuje na principu odstraňování bodů, které nesplňují daná kritéria a ponechávají pouze ty, které daná kritéria splňují. Pro naši potřebu však bude nutné zvolit přesně opačný a navíc i odlišný přístup, tj. ponechat, resp. detekovat pouze ty, které splní dané kritérium a zároveň ostatní body neodstraňovat z důvodu pozdějšího přesnějšího výpočtu morfometrických charakteristik terénu díky větší aproximaci linie.

Nevýhodou Whyatt algoritmu je to, že testuje vždy pouze velikost plochy trojúhelníků pro každé tři body, nedokáže přesně určit samotné kritické body nejvíce vzdálené od hlavní „osy“ výškového profilu. Problém algoritmu Min-Max, který byl uvažován dlouho jako nejvyužitelnější, je v jeho ukončení závislém na rozsáhlém uživatelském vstupu, kdy je nutné nastavit určité hodnoty mezních souřadnic a tuto hodnotu navíc v běhu algoritmu měnit. Algoritmus samotný pak skončí až poté, co se dostane ke stanovenému minimálnímu počtu segmentů u linie, což by pro naše případy nebylo vhodné protože, každý úsek je potřeba rozdělit jen dle výškové členitosti, nikoliv podle počtu segmentů a takovéto násilné rozdělování na další části by mohlo znamenat zvýšení výpočetní náročnosti na celý běh algoritmu a pak také zbytečné rozsekání linií a zvýraznění nepřesnosti vstupních dat a tím samotných koncových výsledků. Zároveň by také bylo třeba definovat a stále využívat všechny rozměry, tj. nejen výškový.

Algoritmus Bend Simplify je velmi často používaným při generalizaci průběhu linií v prostoru, protože generuje linie tvarově méně podobné, mezi segmenty vznikají plynulejší přechody, což je sice kartograficky věrnější, ale z hlediska detekce stacionárních či inflexních bodů méně přesné. Dalším problémem také může být absence jednoduchého uživatelského

vstupu v podobě např. možnosti jednoduchého parametrizování algoritmu. Algoritmus navíc vůbec nezohledňuje délku okolních linií a počítá pouze křivost bodu ve zvoleném poloměru kružnice. Detekovány tak často mohou být body s vysokou hodnotou křivosti, nikoliv však s její změnou. Největší problém ale nastává při detekci bodů stacionárních, které mají největší význam pro účely práce.

Narozdíl od ostatních algoritmů Douglas-Peucker neodstraňuje z L vrcholy nesplňující geometrickou podmínku, ale přidává do ní postupně kritické body podmínku splňující, tzn., dokáže i poměrně rychle běžet. Douglas-Peucker navíc zanechává ostré přechody, jelikož kritické body detekuje přímo v místech s největší vzdáleností od spojnice počátečního a koncového bodu, tj. povětšinou se opravdu jedná o stacionární či inflexní body. To sice není kartograficky věrné při prostorovém zjednodušování linie, nicméně pro účely této práce potenciálně nejvyužitelnější a nejpřesnější metoda pro detekci kritických bodů.

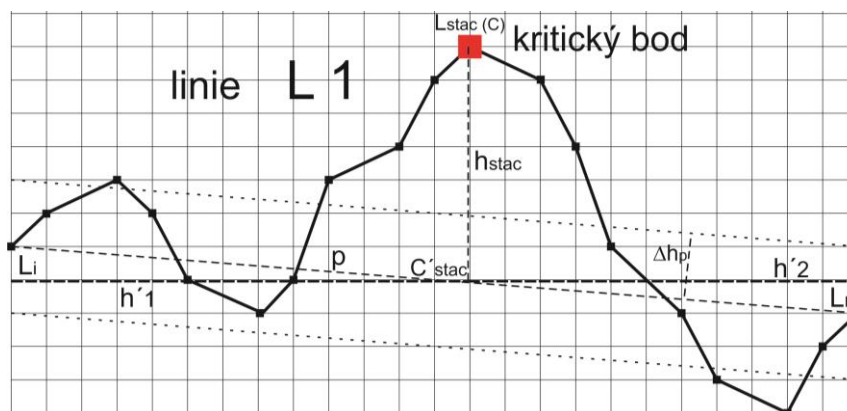
Douglas - Peucker

Douglas – Peucker algoritmus se řadí k nejrozšířenějším algoritmům využívaným v kartografii pro detekování kritických bodů na linii (Zhilin et al., 1993). Zároveň také splňuje požadavek na globálnost a rekurzivnost, což znamená, že je generalizace prováděna s ohledem na celkový tvar lomené čáry a zároveň s možností tento postup opakovat pro nově vytvořené rozdělené linie. Díky tomu je schopen detekovat množství kritických bodů s využitím prahové kolmé vzdálenosti každého z prohledávaných bodů na kolmici spojnice počátečního a koncového takovým způsobem, který vyhledává opravdové extrémy funkce. Míra vyhledávání bodů přitom závisí zcela na rozhodnutí uživatele, což je také bezesporu jeho výhodou.

Tento postup také využil ve své práci pro detekci terénních hran Jaroš (2011), který z pohledu detekce linií terénní kostry implementoval algoritmus pro zjednodušení průběhu příčného profilu tak, aby v něm zůstaly zachovány důležité terénní hrany a naopak byly generalizací byly potlačeny ty, které se na typickém tvaru profilu podílejí pouze zanedbatelně.

4.3.2 Určení prahové hodnoty

Prahová hodnota (Δh_p) určuje vzdálenost potenciálního kritického bodu od vzdálenosti průsečnice počátečního a koncového bodu p, přitom vzdálenost h je vždy u metody Douglas-Peucker kolmá. V případě našeho algoritmu však bude využito kolmého průmětu k aproximovanému zemskému povrchu, jak dokumentuje Obr. 22 níže.



Obr. 22. Určení hodnoty prahové hodnoty h (Zdroj: výzkum autora)

Stanovení optimální velikost prahové hodnoty h závisí především na relativní výškové členitosti zkoumaného území. Jaroš (2011) ve své práci pro detekci terénních hran zkoumal

kolmou hranici na několika relativně odlišných místech s využitím principu Douglas-Peuckerova algoritmu.

V této práci však algoritmus do této doby pracoval většinou pouze na základě sklonů a vzdáleností linií, tj. bez veškeré prostorové lokalizace. Ta sloužila pouze pro určení nadmořských výšek jednotlivých bodů. Pro určení kolmé vzdálenosti by bylo potřeba zakomponovat do metodiky i určení polohových souřadnic jednotlivých bodů na spojnici p (jejich výpočet), aby bylo možné hledat geometrickou (kolmou) vzdálenost bodu od přímky¹⁸. Tento problém však bylo možné řešit i bez využití polohových souřadnic každého bodu díky tomu, že se pohybujeme na poli liniových prvků. Nebylo tak využito metody Douglas-Peuckerova algoritmu ale postupu vlastního, který vytváří kolmici k pomyslnému zemskému povrchu, což je při hodnotách sklonů dosahovaných na silniční síti vhodnější metoda i vzhledem k určování dalších druhů kritických bodů uvedených v kap. 4.4.

Velikost hodnoty nadmořské výšky byla určena na základě odečtu hodnoty z rastrového DMR, jak již bylo řečeno výše. Hlavní otázkou poté bylo, jak určit velikost bodu C' na spojnici počátečního a koncového bodu. Vzhledem k výše uvedeným veličinám, kterými bylo v tu chvíli disponováno, se jevílo jako nejjednodušší využít nadmořských výšek počátečního a koncového bodu a 2D cestní vzdálenosti mezi počátečním (h'_1), koncovým (h'_2) bodem a bodem kritickým a tyto vzdálenosti protichůdně vážit k nadmořské výšce bodu opačného a celkový výsledek dělit součtem vah, tj. délkou celé linie v polohovém rozlišení (2D):

$$C' = \frac{h_1 \cdot L_n + h_2 \cdot L_i}{L_1}$$

Následně už pak byla vzdálenost h prahové hodnoty každého bodu vypočtena na základě rozdílu nadmořských výšek bodů, kde ta nejvyšší u stacionárního (kritického) bodu je definována:

$$h_{stac} = |L_{stac} - C'|$$

Výhoda této metody spočívá především v jednoduchosti a rychlosti daného postupu pro výslednou rychlost algoritmu a pak také, že se dokáže výlučně obejít bez polohových souřadnic bodů na linii p , tzn. do jisté míry odpadá vliv polohové nepřesnosti datových sad. Na druhou stranu to zase může způsobit některé drobné nedostatky, které podrobněji rozebírá samotné testování hodnot prahové hodnoty - kapitola 5.1.

Jaroš (2011) ve své práci volil jako nejvyšší kolmou hodnotu 10 m, což se na silniční síti v této práci ukázalo jako nejnižší možná podávající rozumné výsledky (při parametrech 50 m a 25 m docházelo k detekování jen minimálního množství bodů), nicméně by bylo velmi zajímavé tento postup testovat také v dalších oblastech ČR. Při zvolení parametru na 10 m již algoritmus začínal poskytovat reálnější výsledky, ale při pohledu na výsledky (Příloha 7) je patrné, že pro tuto oblast bylo nejvhodnější zvolit parametr h o velikosti 5 m. Optimum by se pravděpodobně mohlo pohybovat někde okolo této hodnoty. Její exaktní vyjádření je jedním z dalších problémů, který vyvstal při realizaci této práce, avšak obecně je možné říci, že se zvyšující se relativní výškovou členitostí by měla být i zvyšována i hodnota tohoto parametru. V méně členitém reliéfu pak zase o něco snižována, nicméně nikoliv pod hodnotu, která by měla začít výsledky modelu zkreslovat, jak dokazuje i Příloha 7, kde již pro hodnotu 2,5 m nebyly výsledky síťových analýz tak přesné. Při snižující se hodnotě tohoto parametru totiž dochází ke

¹⁸ Vzdálenost bodu od přímky je možné vypočítat pomocí vzorce uvedeného ve zdroji. (Zdroj: SPS Karviná, 2005)

zvýrazňování, do jisté míry je možné říci i sčítání, polohové a výškové nepřesnosti výškových (DMR) i polohopisných (silniční síť) dat.

Dalším ukazatelem, který ovlivňuje zvolení optimální hodnoty h je délka jednotlivých úseků PK, která je pro jednotlivé oblasti odlišná. V městských oblastech je obecně délka jednotlivých úseků kratší, je třeba proto volit hodnoty menší, opětovně však nikoliv pod určitou hranici. Navíc v městském prostředí vstupuje do hry mnohem více faktorů, jako jsou např. veškeré manévry a restriktce nežli jen výšková členitost a délka silničních úseků. Ve zkoumané oblasti, charakterizované spíše jako extravilán, byla průměrná délka úseků zhruba 150 m.

Uvést jedno číslo využitelné pro všechny typy terénu a silniční síť však není možné vzhledem k unikátnosti a specifičnosti každé části území, vyžadovalo by to testování mnohem většího objemu dat, příp. rozsáhlý terénní a geoinformační (morfometrický - členitost a dopravní – délka linií) průzkum, který bohužel nebyl v možnostech této práce.

4.4 Určování křivosti komunikace

Většina SW GIS a výpočtů v rešeršní části je uvedena na základě výpočtu křivosti ve směru tzv. ortogonální sítě, to jsou však jen vrstevnice a spádnice. Ve směru těchto křivek probíhají procesy modelující georeliéf (Demek, 1988), nikoliv však procesy modelujícího velikost pohybového vektoru ve směru orientace cestního úseku. Zde probíhají změny velikosti pohybového vektoru, tj. procesy akcelerační (zvyšování akcelerace – zvyšování velikosti pohybového vektoru) nebo decelerační (snižování akcelerace – snižování velikosti pohybového vektoru). Pro tyto jevy v součinnosti s hodnotou křivosti je také důležitá hodnota sklonu svahu. Kvůli tomu má normálová křivost ve směru orientace linie mimořádný význam z hlediska procesu modelování pohybu vozidel (cyklisty) ve směru orientace linie, která reprezentuje silniční síť a která je už i svou povahou křivka a dochází zde ke změnám její křivosti na základě lomových bodů (Voženílek, 2001).

Teoretickým řešením by mohlo být využití metodiky Louthana (2010), který na základě podkladového gridu sklonů počítal průměrný sklon dané komunikace. I tato metodika však naráží na problém s odlišností orientace každé linie, orientace křivosti horizontální i vertikální a zároveň také nepřesností s výpočtem křivosti celkové, která vyjadřuje průměrnou křivost bodů na základě aproximace území o velikosti okolních 8 segmentů (tzn. křivost území nikoliv linie), což by v našem případě činilo rozlohu skoro 40 m_2 vzhledem k prostorovému rozlišení rastru 2 m. Bylo by tak nutné mít k dispozici přesnější výšková data, ze kterých by bylo možné generovat menší hodnoty velikosti pixelů v závislosti na zvolené šířce komunikace 4 m, tzn. zhruba poloviční velikost pixelu (1 m), pořád bychom však částečně naráželi na problém orientace komunikace vůči jednotlivým pixelům.

Pro uplatnění ve zpřesňující metodice by tak bylo potřeba, aby byla křivost počítána pouze na základě druhých derivací hodnot nadmořské výšky, a to pouze u těch sousedních buněk, kterými prochází cestní síť. To by vyžadovalo určit pro každý segment jeho úhlovou orientaci vůči souřadnému systému a tím i vůči orientovanosti gridu. Tento postup by byl značně komplikovaný a narážel by také na problematiku vlastností gridu, tj. že např. existují pouze 3 základní směry u sousedních buněk (po směru řádek a sloupců či úhlopříčně). V našem případě by tak teoreticky bylo vhodnější vyhledávat širší okolí buňky pro zpřesnění orientace ve směru silniční sítě. Při hledání hodnoty tohoto nejbližšího vhodného pixelu by mohly být nápomocny

právě další lomové body, které tvoří geometrii celé linie a za pomoci nichž můžeme křivost liniového prvku určit.

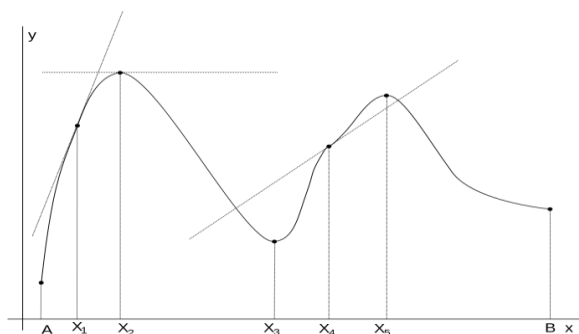
Tento problém, určení vztahu křivosti silniční sítě (liniových prvků) k síťovým analýzám, nebyl doposud patřičně řešen. Narozdíl od sklonu, který je možné a vlastně i nutné přiřazovat jednotlivým segmentům (částí linie) a pro jeho výpočet je potřeba znát alespoň 2 body, pro výpočet nenulové hodnoty křivosti liniového prvku je nutné mít k dispozici min. body 3.

Existují pouze další dva případy, zde je velikost křivosti vždy rovna nule:

- je-li liniový prvek tvořen pouze koncovým a počátečním bodem, jedná se o přímku¹⁹.
- je-li linie tvořena segmenty o stejném sklonu, tj. $\Delta s = 0$.

Ve většině případů by žádná pozemní komunikace neměla mít vertikální ani horizontální křivost rovna nule dle norem ČSN 73 61 01 z důvodu nastavení odtokových ploch. Stejně tak ani v SW GIS většina linií není tvořena pouze počátečním a koncovým bodem, nýbrž několika lomovými mezilehlými body, díky nimž je $K \neq 0$, pokud se nerovná velikost sklonu segmentů. Horizontální křivost by navíc na ak/de-celerační procesy neměla mít takový vliv jako křivost vertikální, jelikož pohyb probíhá ve směru orientace linie, nikoliv ve směru kolmém na PK (linii). Většina těchto faktorů podporuje realizaci výše navržené metodiky.

Teoreticky by pro ještě přesnější výpočet křivosti bylo zapotřebí mezi zbylými lomovými body určit tzv. inflexní body (Obr. 23). V inflexním bodě se mění zakřivení grafu funkce a tečna grafu v tomto bodě graf protíná. Na Obr. 23 jsou inflexními body x_1 a x_4 .



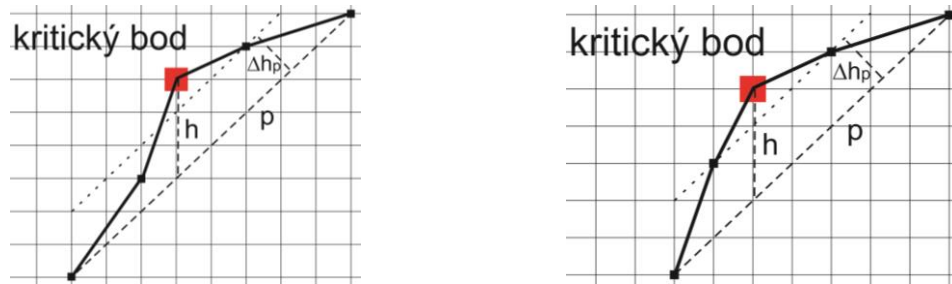
Obr. 23. Inflexní bod x_1 a x_4 (Zdroj: Wikipedia, 2008)

Problémem by však bylo, že tato zpřesňující metoda v podobě dalšího rozsekání linie na několik dílčích podlinií by byla v dané oblasti spíše kontraproduktivní (jen by se enormně zvýšil počet hran sítě a zvýraznily případné nepřesnosti v odvozeném digitálním modelu). Zvýšila by se tak i náročnost výpočtových procesů a naopak snížila by se použitelnost této metodiky pro rozsáhlejší území (využití za celou ČR). Tento problém by pak musel být řešen pravděpodobně opětovným spojením jednotlivých částí segmentů linie dle vybraných statistických metod (vážené průměrování, posloupnost linií apod.) a přepočtem na výsledný koncový koeficient pro daný úsek. Zároveň by také muselo zpětně dojít k přepočtení velikosti sklonu u všech nově vytvořených linií.

Důležité je však říci, že metodika nalezení kritických bodů uvedená v kap 4.3.1 v sobě obsahuje i detekci dalších signifikantních bodů, jak dokumentuje Obr. 24. Kritickým bodem

¹⁹ V rovině existují dvě křivky, jejichž křivost je konstantní: kružnice ($K = 1/r$), kde r je poměr křivosti, a přímka ($K = 0$) (Zdroj: SPS Karviná, 2005)

totiž nemusí být vyhodnocen vždy jen bod stacionární, nýbrž právě i bod inflexní, jak dokazuje Obr. 24 níže (vlevo).



Obr. 24. Vyhodnocení kritických bodů při nestandardních situacích (inflexní – vlevo, ostatní – vpravo)
Zdroj: výzkum autora)

Dokonce může nastat i případ, kde navržená metodika rozdělí linie v kritickém bodě, který nebude ani stacionárním ani inflexním bodem, jak ukazuje Obr. 24 (vpravo). Nicméně určením i tohoto bodu jako kritického dojde ke zpřesnění modelace pohyby po cestní síti. Tyto body totiž představují povětšinou hranice mezi vyššími a nižšími (příp. obráceně) hodnotami sklonu, kde dochází k největším změnám ve velikosti pohybového vektoru. Jedná se o tzv. terénní hrany (Veverka; Zimová, 2008), v prvním případě jde o přehyb, v druhém o plynulý přechod (Brugelmann, 2000).

Navržená metodika by tak měla vycházet z několika předpokladů:

- většina úseků silnic nabývá nulové horizontální křivosti je tak možné vertikální křivost považovat za celkovou křivost i vzhledem ke směru jízdy,
- exaktní výpočet křivosti je možný pouze pro bodovou vrstvu,
- pro extrapolovaný výpočet nenulové hodnoty křivosti liniového prvku je nutné mít k dispozici min. body 3 (min. 1 lomový bod).

Pokud bychom tedy vycházeli z těchto tří základních předpokladů, výpočet křivosti pro liniové prvky by nebyl možný, nicméně díky incidenci jednotlivých lomových bodů je možné tyto hodnoty vážit na základě délky sousedících segmentů.

V našem případě bude nutné přiřadit určitou hodnotu křivosti na základě průměru všech hodnot lomových bodů, které se na dané linii vyskytnou. Tato část by měla být zajištěna pomocí určení vertikální křivosti v jednotlivých lomových bodech a její vážení vždy délkou okolních dvou segmentů. Samotná křivost pro jednotlivé body by byla vypočítána na základě gradientů – diferencíálů sklonu. Díky vážení vzdálenostmi vždy okolních dvou segmentů bodu by došlo k situaci, že pro segmenty s počtem větším nežli 1 lomový bod, by byly vnitřní segmenty ohraničené lomovými (mezilehlými) body váženy vždy 2x. Bylo proto nutno pro celkovou délku vážených segmentů (součet vah) zařadit odečet vždy 2 krajních segmentů (incidentních s počátečním a koncovým bodem), jak uvádí i níže uvedený výpočet.

Výsledkem by měla být průměrná hodnota křivosti, která by byla přiřazena celému úseku linie v jeho délce.

Navržená metodika:

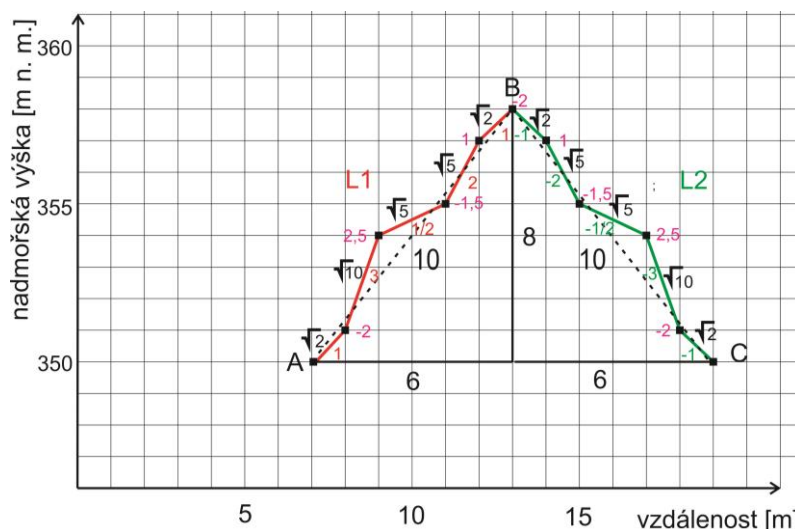
$$K_{L1} = \sum_{i=1}^n \frac{(l_i + l_{i+1}) \cdot (s_i - s_{i+1})}{2 \cdot (L - (l_i + l_n))} = \frac{(l_1 + l_{i+1}) \cdot (s_i - s_{i+1}) + (l_{i+1} + l_{i+2}) \cdot (s_{i+1} - s_{i+2}) + \dots + (l_{n-2} + l_{n-1}) \cdot (s_{n-2} - s_{n-1}) + (l_{n-1} + l_n) \cdot (s_{n-1} - s_n)}{2 \cdot (l_1 + l_{i+1} + \dots + l_{n-1} + l_n - (l_i + l_n))} =$$

$$\frac{(\sqrt{2} + \sqrt{10}) \cdot (1 - (+3)) + (\sqrt{10} + \sqrt{5}) \cdot (3 - \frac{1}{2}) + (\sqrt{5} + \sqrt{5}) \cdot (\frac{1}{2} - 2) + (\sqrt{5} + \sqrt{2}) \cdot (2 - 1)}{2 \cdot (\sqrt{2} + \sqrt{10} + \sqrt{5} + \sqrt{5} + \sqrt{2} - (\sqrt{2} + \sqrt{2}))} = 0,0842 = K_{L2}$$

$$K_{AC} = 0,4417$$

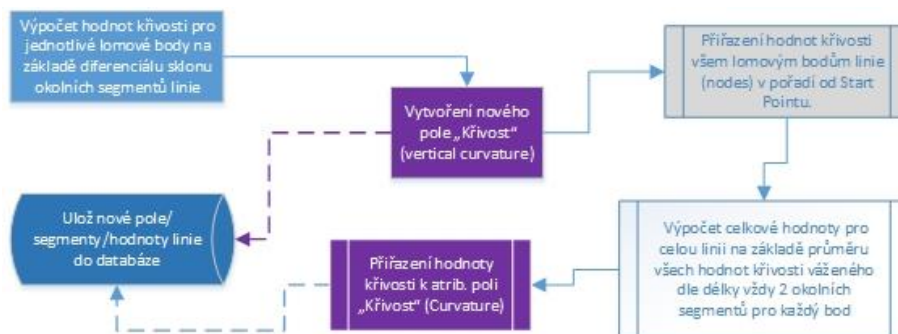
Pozn.: Ilustrativní výpočet výše i Obr. 25 pro zjednodušení počítají pouze s délkou segmentu ve 2-rozměrném prostoru, algoritmus však zohledňuje délku povrchovou. Mezivýpočty u celkové křivosti linie A-C nebyly z důvodů zbytečné složitosti dokumentovány. Ověření výpočtů proběhlo v SW Matlab.

Jak demonstruje Obr. 25 níže, hodnoty křivosti narozdíl od hodnot sklonu jsou přiřazovány mezilehlým bodům (sklon segmentům). Výpočet křivosti tak byl určen na základě lomových bodů linie, které tvoří její geometrii, došlo tak k zapojení zmiňované orientace linií díky jejich využití. Toto řešení s sebou přineslo některé problémy, které jsou popsány v kapitole 5.3 a v diskuzi.



Obr. 25. Ilustrace navržené metodiky výpočtu křivosti pro linové prvky (Zdroj: výzkum autora)

Obr. 25 dokumentuje funkčnost tohoto výpočtu pro jednotlivé linie i linii jako celek (A-C). Její tvar odpovídá konvexním formám reliéfu, které nabývají kladných hodnot, což také potvrzuje výsledná hodnota + 4,4 %, která je i zároveň vyšší nežli hodnoty samotných podlinií, což potvrzuje teoretickou funkčnost této metodiky. Celé schéma procesu výpočtu křivosti od přiřazení hodnot k jednotlivým mezilehlým bodům až po uložení hodnot do databáze je zobrazeno na Obr. 26 níže.



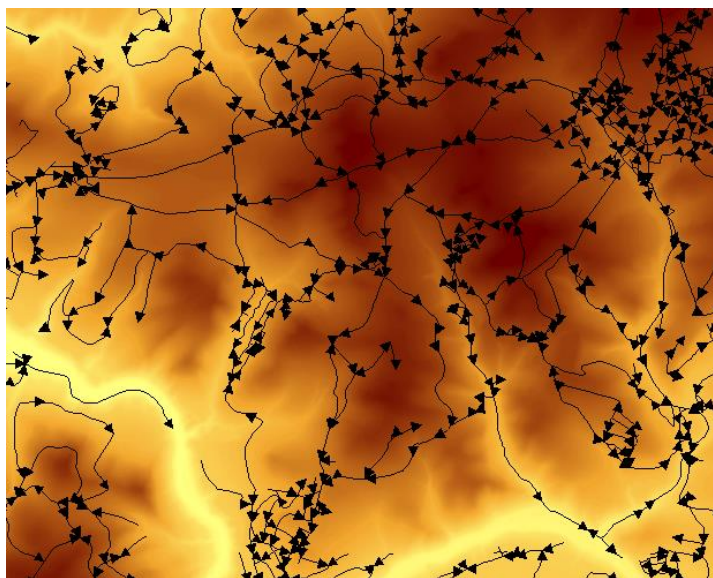
Obr. 26. Procesní výpočtové schéma křivosti (vysvětlivky viz Příloha 15, Zdroj: výzkum autora)

4.5 Směr pohybu po síti

Dalším geoinformatickým problémem, který bylo nutno řešit v této práci, bylo rozlišení směrovosti jednotlivých prvků v závislosti na orientaci při jejich digitalizaci, tj. jakým způsobem přiřadit výsledné hodnoty morfometrických charakteristik ve vztahu ke směru pohybu po síti (směru jízdy).

Rychlost by měla být vypočtena v závislosti na orientaci linie (tj. rozlišení stoupání, klesání či roviny), kdy příznak FT (From-To) představuje orientaci ve směru digitalizace a TF (To-From) proti směru digitalizace. Tento atribut v síťových analýzách umožňuje po správném oboustranném ohodnocení hran vypočítat výslednou dobu pohybu po grafu ve vztahu k DMR. Dokáže rozlišit směr pohybu po síti a zvolit správnou hodnotu, která má být přiřazena pro ohodnocení při vyhledávání trasy. Odliší tak např. dojezdové časy v oblastech s vyšší relativní výškovou členitostí. Výsledný čas pro projetí daného úseku z bodu A do bodu B se tak většinou nebude rovnat výslednému času pro projetí z bodu B do bodu A. Řešení je možné provést pomocí základních dotazů na geometrii, která dokáže rozlišit počáteční a koncový bod.

Na následujícím Obr. 27 je vidět orientace digitalizovaných linií ve zkoumaném území v prostředí GIS. Takto je v síti PK zorientována každá linie. Rozdělení je velmi důležité nejen pro odlišení sklonitosti, ale zároveň také pro pohybové manévry (zákazy odbočení, zákazy vjezdu, přikázané směry jízdy, jednosměrné komunikace apod.). Tyto informace jsou velmi cenné pro navigační systémy, především v silniční motorizované dopravě. U cyklistické dopravy nalézají uplatnění především restriktce – zákaz vjezdu, pěší zóna, konec cyklostezky, „cyklisto sesedni z kola“ apod (Hlásný, 2010). Všechny tyto manévry a restriktce byly implementovány do výsledné testovací datové sady.



Obr. 27. Orientace linií v prostředí GIS (Zdroj: výzkum autora)

Určení orientace sklonu vs. orientace linie bylo vyřešeno na základě samotného výpočtu sklonitosti, jelikož metodika implicitně nastavuje začátek výpočtu sklonitosti jednotlivých segmentů na jeho počáteční bod, výsledná hodnota sklonu byla přiřazena k atributu FT (From-To), tj. ve směru orientace linie. Ve směru proti orientaci linie TF (To-From) byla přiřazena hodnota opačná, tj. vynásobená koeficientem $* (-1)$.

4.6 Převod morf. parametrů na pohybový vektor

Stanovit průměrnou rychlost k projetí úseku na základě informace o hodnotách sklonu a křivosti komunikace je velice složité. Ve skutečnosti ovlivňuje jízdu po pozemní komunikaci ještě celá řada přímých i nepřímých faktorů (viz kapitola 2.5 výše). Aby bylo možné definování vztahu DMR a síťových analýz, bylo nutné najít převodní rovnice mezi parametry morfometrickými a parametry vhodné pro síťové analýzy.

V motorizované silniční dopravě by bylo např. možné jednotlivé maximální sklonové poměry porovnat v normě ČSN 73 6101 s návrhovými rychlostmi pro různé typy silnic v závislosti na typu reliéfu. Tato norma je však určena pro motorizovaná vozidla, pro cyklo dopravu žádné podobné neexistují. Pro nalezení převodní rovnice tak opět muselo být hledáno v dosud využitých modelech dostupnosti užívaných v cyklo dopravě a za využití vlastních převodních rovnic, které byly určeny na základě terénního průzkumu ve vybraném území.

4.6.1 Terénní průzkum – popis území

Před vlastním popisem jednotlivých činností při modelování cyklo dopravy je adekvátní uvést stručnou charakteristiku zájmového území, aby byly alespoň okrajově nastíněny místní fyzicko-geografické a sociokulturní poměry a také přiblíženo zdejší řešení cyklistické dopravy, kde byla zároveň testována funkčnost daného algoritmu.

Posázaví je území vhodné pro terénní průzkum vzhledem k tomu, že se jedná o oblast s vysokou reálnou výškovou členitostí, které na jihu území modeluje řeka Sázava, jak je ukazuje Příloha 4. Je to také oblast se všemi druhy PK – od polních a lesních cest až po asfaltové komunikace (zpevněné), což dokazuje opět Příloha 4.

Jak již bylo naznačeno v úvodu kapitoly 2.4, problematika vlivu různých faktorů na rychlost cyklisty není takřka vůbec řešena, příp. velmi nepřesně jako např. metodou tužka a papír se zapisováním rychlostí z tachometru během jízdy a poté nepřesnou lokalizací bodů na silniční síť. U řady zdrojů je např. konstatována pouze průměrná rychlost cyklisty nejčastěji mezi 15-20 km/h, příp. 15-25 km/h u TP 179 (MD ČR, 2006). Pokud však mají síťové analýzy podávat co nejpřesnější výsledky, je potřeba zohlednit jak jízdu z kopce či do kopce, tak i další faktory se kterými se cyklista potýká. Tyto jevy značně ovlivňují rychlost na každém z konkrétních úseků cesty a nelze tedy použít jen zmíněnou „univerzální“ rychlost. Vzhledem k nedostupnosti exaktní metodiky a vzorců pro výpočet bylo východiskem vlastní terénní šetření. Nabízelo se několik možných přístupů k praktickému provedení výzkumu:

- v závislosti na počtu testovaných jezdců,
- množství analyzovaných úseků,
- použití odlišných jízdních kol apod.

Pro detekci vlivu jmenovaných faktorů je však nejdůležitější získat měřená data z co nejvíce různorodých úseků infrastruktury, aby se v nejvyšší možné míře odstranil jev náhodnosti. Z tohoto důvodu bylo nejúčelnější zvolit formu, kdy jeden cyklista testovacími jízdami zmonitoruje co nejvíce reprezentativních prvků infrastruktury, což by bylo v případě většího počtu cyklistů velmi těžko proveditelné a hlavně by se i měnily převodní koeficienty, které má každý jedinec unikátní. To by pro následné porovnávání s reálnými časy navíc nebylo přesné.

Navíc ja-k již bylo stanoveno výše, lidský faktor v této práci uvažován nebyl. Proto bylo v zájmovém území projžděno co největší počet komunikací jak se zpevněným povrchem²⁰, tak i polních a lesních cest s povrchem nezpevněným. Z nich byly zároveň také vybírány trasy s různou relativní výškovou členitostí, u kterých byl změřen celkový cestovní čas pro následné testování.

Čas u jednotlivých modelových tras (Příloha 5) byl počítán na základě průměru dvou nezávislých měření na stejném úseku. Velmi důležité také bylo, že veškeré trasy musely být projžděny v obou směrech najednou, aby jim bylo možné přesněji interpolovat hodnoty rychlostí na základě převodní rovnice. Každou trasu tak bylo třeba projzdit celkem 4x. Vzhledem k tomu, že informace o typu a stavu povrchu vozovek byla k dispozici pouze ve formě diskrétní (nespojité) veličiny, bylo nutné pro jednotlivé povrchy převodní rovnice určit odděleně.

Samotná metodika sběru dat byla nastavena na základě záznamu GPS tracklogu. Sběr bodů pomocí GPS byl realizován na veškerých pozemních komunikacích, především od silnic II. tříd až po účelové a místní komunikace, včetně polních a lesních cest, nikoliv však v takovém šířkovém uspořádání, které by nedovolovalo fyzický průjezd vozidlem motorizovaným kategorie M (dle Zákona č. 56/2001 Sb.) se standardní šířkou. Vynechány tak byly z výzkumu stezky pro pěší, které by pravděpodobně vykazovaly naprosto odlišné hodnoty a u kterých by bylo potřeba zvolit větší přesnost vstupních výškových dat, jiný interpolační mechanismus a pravděpodobně i jiný způsob detekce kritických bodů.

4.6.1 GPS data

Navigační využití technologie GPS je stále častější. Nejde jen o jízdu automobilem po hlavních silničních a dálničních trasách, ale stále častěji i o navigaci při cykloturistice. Na navigační GPS přijímače jsou kladeny různé nároky, co se týká jejich konstrukce, funkcí a vlastností podle předpokládaného využití. Jedno z dělení navigačních GPS přijímačů je podle oblasti využití (Čábelka, 2008):

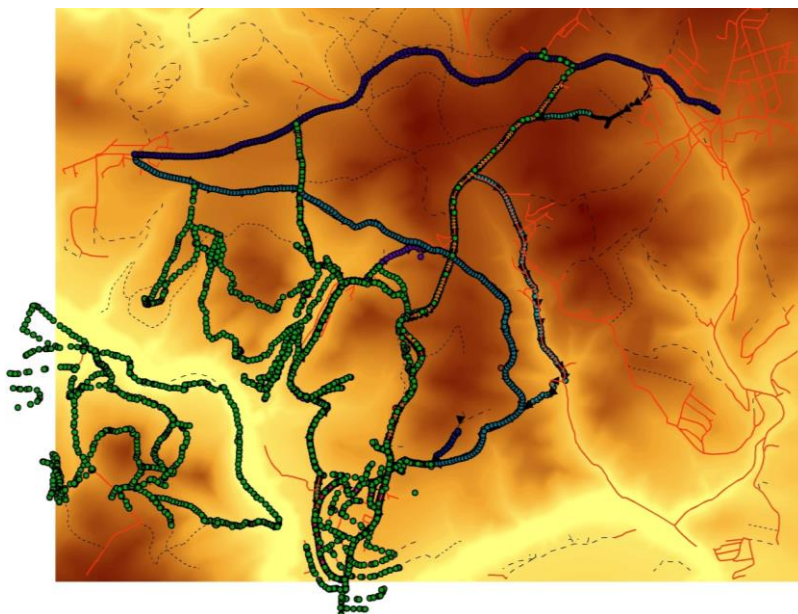
- Turistika,
- **Cykloturistika,**
- Motorismus.
- Námořnictví, loď.
- Létání.
- Multifunkční přístroje.

Základními funkcemi navigačních GPS přijímačů podle Čábelky (2008) potom jsou: zaměření polohy přijímače a **nadmořské výšky**, zaměření **okamžité**, průměrné a maximální **rychlosti** pohybu, **určení směru pohybu** a přesného času. Pokud je definovaný cíl trasy, přístroj počítá vzdálenost do cíle a směr k němu, zbývající čas do cíle a čas dojezdu do cíle, příčnou odchylku od kurzu a odchylku mezi směrem pohybu a směrem na cíl.

Díky těmto funkcím tak bylo možné velmi přesně zaznamenávat v jednotlivých bodech trasy nadmořskou výšku, okamžitou rychlost i směr pohybu. Průběh trasy však nebyl zaznamenáván nepřetržitě v časovém intervalu. Výsledná linie byla vytvořena na základě interpolace měření polohy ve vzdálenostním intervalu přibližně 10 metrů (nižší nastavit nešlo)

²⁰ Definice zpevněného a nezpevněného povrchu komunikací vychází z ČSN 73 61 00.

z důvodů odstranění potenciálně nepřesných (odlehých) měření vzniklých na základě brzdění, rozjezdů (tj. na začátku a konci trasy) a zároveň také díky nutnosti co nejpřesněji trasu aproximovat větším množstvím bodů, jelikož se její průměrná rychlost vypočítává na základě přímé délky úseků, které tvoří každé dva incidentní body. V takto vzniklém souboru liniových prvků (*.gpx) jsou uchovávány souřadnice jednotlivých lomových bodů linie v systému WGS 84. Celkový počet zaznamenaných bodů činil zhruba 4000 a je vizualizován na následujícím Obr. 28.



Obr. 28. GPS trackpointy naježděné terénním průzkumem (Zdroj: výzkum autora)

Sběr dat proběhl pomocí turistických GPS přístrojů Garmin Legend a Garmin Vista HCx určených pro cyklopravu, které byly připevněny na horské kolo Merida Matts-sport.

Otázkou také bylo využití dat o nadmořské výšce přímo z GPS měření, tj. vztah sklon-rychlost určovat přímo bez využití DMR-4G. Hodnoty nadmořské výšky naměřené navigačním systémem GPS jsou však méně přesné než hodnoty z DMR-4G. To potvrzuje i Žďánský (2012) či Velhartický (2006), který v práci zabývající se výškovou přesností navigačních systémů při cyklopravě, stanovuje odchylku výšek naměřených v otevřeném terénu při dvou průjezdech na hodnotu nejméně $2,55 \pm 1,79\text{m}$ (průměrná odlehlost dat a jejich směrodatná odchylka). Na druhém konci pomyslného žebříčku přesnosti se umístily úseky vedoucí městskou zástavbou. Vlivem častého stínění a odrazů signálu satelitů dosahovaly vzájemné odchylky naměřených výšek $10,26 \pm 8,02\text{m}$. Obě hodnoty jsou pro tuto práci naprosto nedostačující i v porovnání s výškovou přesností DMR-4G, a proto byly výškové hodnoty vypočteny na základě DMR.

Zpracování bodů bylo nejprve zajištěno pomocí softwaru BaseCamp, který dokáže výsledná surová data (NMEA log) převést na formát (*.gpx) využitelný v SW GIS. Následně proběhl import rychlostí proti a po směru pohybu na základě tabulky hodnot vypočtených z incidence jednotlivých bodů a její následné připojení k nim. V dalším kroku tak již zbývalo k bodové vrstvě přiřadit informace o morfometrických parametrech terénu. To bylo zajištěno na základě lokalizace nejbližšího úseku PK, která již měla tyto údaje vypočtené na základě navržené metodiky, na bodovou vrstvu.

Lokalizace k síti PK byla realizována pomocí pravoúhlých kolmic (spojnic bodů a nejbližšího liniového prvku – viz Obr. 29), kde byl přiřazen primární klíč úseků PK k bodové

vrstvě. Na základě primárního klíče PK byla následně připojena k bodové vrstvě i informace o vypočteném sklonu a křivosti nejbližší linie, ale zároveň také třeba i důležitého povrchu komunikace. Zároveň byla zvolena hodnota hraničního vyhledávacího parametru na 10 m. Body, které ležely ve větší vzdálenosti od nejbližší linie, nebyly pro účely práce lokalizovány (Obr. 29, body červeně zvýrazněné). Jednalo se tak pouze o odlehlá měření a body byly z výsledné analýzy vypuštěny.

Celkově tak bylo lokalizováno zhruba 2400 bodů, z nichž 1800 bylo přiřazeno ke komunikacím se zpevněným povrchem a 600 s nezpevněným povrchem – šterkové, pískové podloží, polním a lesním cestám. Tento nepoměr byl dán i větší ztrátou bodů právě u druhé kategorie komunikací, které velmi často procházejí lesními a jinými zakrytými úseky, kde je přesnost GPS signálu obvykle snížena okolními vlivy a nedosahuje takových hodnot.



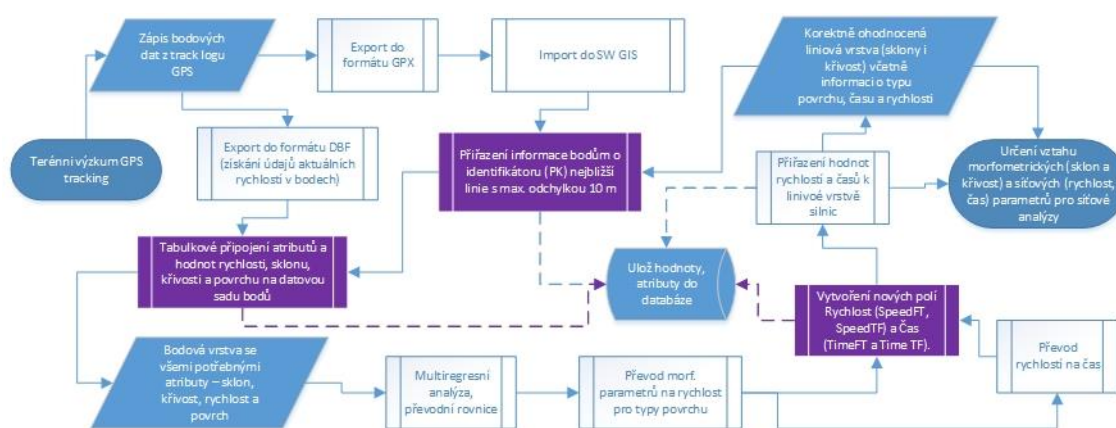
Obr. 29. Lokalizace bodů na linii s využitím vyhledávacího parametru (červeně v kroužku nelokalizované body, Zdroj: výzkum autora)

Velmi důležité bylo v tomto ohledu rozdělit silniční síť na opravdu krátké úseky díky velkému množství bodů a zároveň u jednotlivých tras připravit datovou sadu tak, aby orientace linií vždy korespondovala se směrem jízdy a bylo možné k ní poté automatizovaně přiřazovat hodnoty sklonu, což bylo realizováno pomocí navržené metodiky s nižší hodnotou parametru h . Jednotlivé úseky tak představovaly homogenní krátké segmenty s velmi přesnou aproximací a hodnotou sklonu.

Výsledná bodová vrstva tak již obsahovala všechny potřebné údaje:

- rychlost po směru orientace linie,
- rychlost proti směru orientace linie (pokud existovala),
- sklon ve směru orientace linie,
- sklon proti směru orientace linie,
- křivost linie,
- povrch a stav komunikace (linie).

Celý postup zachycuje níže uvedené schéma na Obr. 30.



Obr. 30. Schéma terénního výzkumu od sběru dat až po testování v síťových analýzách (vysvětlivky viz Příloha 15, Zdroj: výzkum autora)

Po získání všech těchto údajů bylo možné přejít k určení trendové rovnice pomocí multiregresní (vícenásobné regresní) analýzy, kde na základě dvou proměnných (sklon a křivost) byla hledána funkční závislost na hodnotách rychlosti. Jak již bylo řečeno výše, nejdříve bylo nutné odlišit místa s různými typy povrchů a pro ně převodní vztahy modelovat zvlášť i z důvodu toho, že typ povrchu není spojitá veličina a zařazovat ji jako další proměnnou do analýzy by nebylo vhodné. Celý model by se jen zbytečně komplikoval. Navíc při stanovení regrese tří a více proměnných není možné vztah přehledně vizualizovat

Výsledná bodová vrstva, která vstupovala do multiregresní analýzy byla tvořena vždy trojicemi hodnot v pořadí závislá a proměnné:

- rychlost po směru orientace linie (pokud existovala), sklon ve směru orientace linie, křivost linie nebo,
- rychlost proti směru orientace linie (pokud existovala), sklon proti směru orientace linie, křivost linie.

4.6.2 Regresní analýza

Regresní metody slouží k modelování závislosti mezi kvantitativními znaky spojitého typu a korelace slouží k měření síly této závislosti (Zvára, 2008). V nejjednodušším případě je totiž lineární závislost jedné veličiny, tzv. závislé proměnné Y - rychlost, na jiné veličině, tzv. nezávislé proměnné X (sklon). Jednalo by se tak o jednoduchou lineární regresi.

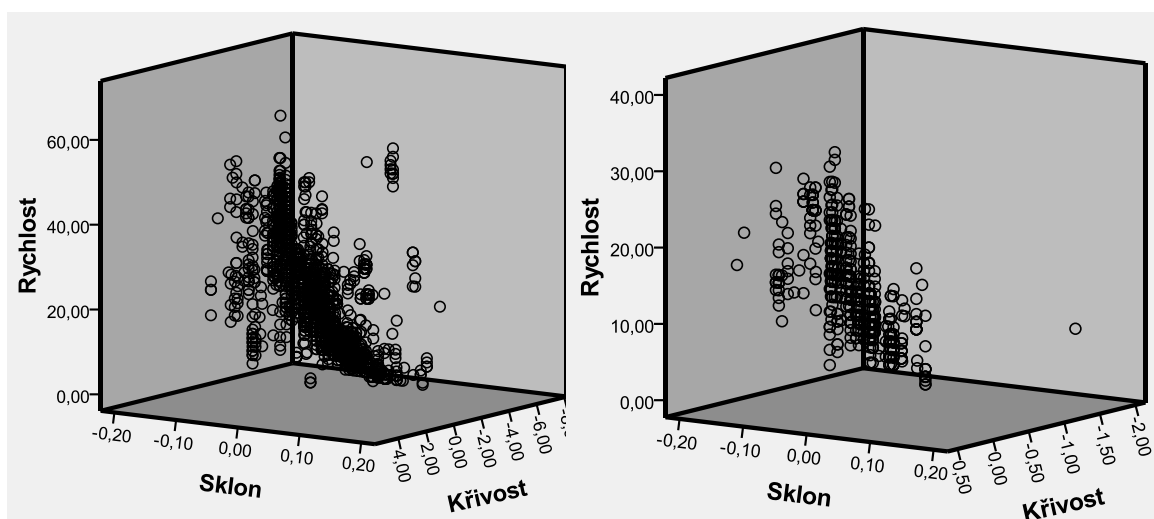
V případě této práce však bylo nutné do analýzy zohlednit také křivost povrchu. Veličinu Y tak musíme vysvětlovat jako lineární kombinaci více proměnných (tzv. regresorů) X_1, X_2, \dots, X_k , $k \geq 2$. V takovém případě bude možné hovořit o mnohonásobné lineární regresi (multiple linear regression). Důležitým předpokladem je zde vzájemná nezávislost vysvětlujících proměnných X_1 – sklonu a X_2 – křivosti. Jsou-li nezávislé proměnné vzájemně silně korelovány, hovoříme o problémech spojených s multikolinearitou regresorů. Korelace by však z důvodu nezávislosti těchto proměnných neměla nastat. Jak i Tab. 9 níže uvádí, mezi jednotlivými proměnnými nedošlo k závislosti z důvodů velmi nízké hodnoty (-0,02) Pearsonova korelačního koeficientu (r):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Korelace				
		Rychlost	Sklon	Křivost
Pearson Correlation	Rychlost	1,000	-,797	-,115
	Sklon	-,797	1,000	-,020
	Křivost	-,115	-,020	1,000
Sig. (1-tailed)	Rychlost	.	,000	,000
	Sklon	,000	.	,193
	Křivost	,000	,193	.

Tab. 9. Výpočet korelačních koeficientů pro testování nezávislosti proměnných (Zdroj: výzkum autora)

Důležitým krokem při jakékoliv analýze je grafické znázornění dat a zkoumaných závislostí. Jelikož v mnohonásobné regresi s dvěma regresory je možné graficky zkoumat povahu závislosti sledované závislé proměnné veličiny na všech nezávisle proměnných současně pomocí 3D výškového grafu, byly znázorněny marginální závislosti dvou nezávislých proměnných na Obr. 31 níže.



Obr. 31. 3D graf závislosti sklonu a křivosti na závislé rychlosti na zpevněných (vlevo) a nezpevněných (vpravo) cestách (Zdroj: výzkum autora)

Model mnohonásobné lineární regrese má tvar (Zvára, 2008):

$$y_i = \alpha + \beta_1 x_{1,i} + \dots + \beta_k x_{k,i} + \varepsilon_i, \quad k \geq 1, i = 1, \dots, n$$

přičemž $\alpha, \beta_1, \dots, \beta_k$ nazýváme parametry modelu (též regresní koeficienty) mnohonásobné lineární regrese, $x_{1,i}, \dots, x_{k,i}$ značí hodnoty nezávisle proměnných veličin i-tého subjektu (sklon a křivost), ε_i označuje náhodnou veličinu z normálního rozdělení $N(0, \sigma^2)$. Parametr σ^2 se nazývá reziduální rozptyl (Res).

Odhady parametrů obdržíme pomocí metody nejmenších čtverců a značíme je a, b_1, \dots, b_k . Metoda nejmenších čtverců je založena na minimalizaci výrazu (Zvára, 2008):

$$S_e = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a - b_1 x_{1,i} - \dots - b_k x_{k,i})^2,$$

nazývaného reziduální součet čtverců (Residual). Tento matematický problém vede k soustavě rovnic, jejímž řešením jsou právě hledané hodnoty a, b_1, \dots, b_k . Jim odpovídající S_e se používá

k výpočtu odhadu reziduálního rozptylu σ^2 :

$$s^2 = \hat{\sigma}^2 = \frac{S_e}{n - (k + 1)}$$

Výsledné regresní převodní rovnice pro složitější model s využitím proměnné křivosti x_2 :

- lineární s křivostí pro zpevněné komunikace: $y = 22,32 - 181,54 x_1 - 1,45 x_2$
- lineární s křivostí pro nezpevněné komunikace: $y = 15,13 - 74,69 x_1 - 3,63 x_2$

Z výsledného odhadu regresních modelů je možné vidět, že průměrná rychlost při nulovém sklonu (na rovině) i křivosti reliéfu odhadnuta u zpevněných komunikací na 22,3 km/h a u nezpevněných na 15,1 km/h, což by mělo odpovídat realitě, stejně jako vyšší vliv sklonitosti u zpevněných komunikací na celkovou rychlost. Co ale neodpovídá předpokladům je záporná hodnota parametru u proměnné křivosti. Ta by měla nabývat hodnot kladných z důvodu potenciálního snížení rychlosti díky deceleračním procesům na konvexních segmentech se zápornou hodnotou křivosti, resp. zvýšení rychlosti díky akceleračním procesům na konkávních segmentech s kladnou hodnotou křivosti. Možné vysvětlení je uvedeno níže v této kapitole.

Odhady náhodných složek ε_i ($i = \{1, \dots, n\}$) v modelu jsou nazývány rezidua e_i . Jsou to odchylky pozorovaných hodnot závisle proměnné y_i od hodnot \hat{y}_i předpovězených na základě modelu mnohonásobné lineární regrese, tj. $e_i = y_i - \hat{y}_i$. Předpoklad normality náhodné složky ε je nutné pro analyzovaná data ověřovat (Zvára, 2008). K posouzení vhodnosti a výstižnosti konkrétního modelu slouží reziduální diagnostika, která je důležitou součástí regresních metod.

Podílem odhadu hodnoty regresního koeficientu a odpovídající směrodatné chyby je obdržena Waldova t-statistika, jejichž dosažené hladiny významnosti (p-value) odpovídají významu jednotlivých nezávisle proměnných uvažovaného modelu. Zvolíme-li například hladinu významnosti neboli pravděpodobnost chyby I. druhu $\alpha = 0,05$ (což je v praxi nejčastější volba), potom lze nezávisle proměnnou považovat v daném regresním modelu na základě Waldova testu za významnou, bude-li dosažená hladina významnosti p příslušné t-statistiky menší než 0,05. V našem příkladě je takovou proměnnou sklon nebo křivost, neboť dosažená hladina významnosti odpovídající t-statistiky má hodnotu $p = 0,000$. Nutno také poznamenat, že zmíněné t-statistiky mají stejný počet stupňů volnosti (df, degrees of freedom) jako reziduální součet čtverců, respektive odhad reziduálního rozptylu. V našem případě $df = n - (k + 1) = 1798$.

ANOVA ^c						
	Model	Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig. (p)
Jednoduchý	Regression SS_{Reg}	166342,235	1	166342,235	3124,743	,000 ^a
	Residual	95767,777	1799	53,234		
	Total SS_{Tot}	262110,012	1800			
Složitý	Regression SS_{Reg}	170827,597	2	85413,798	1682,405	,000 ^b
	Residual	91282,415	1798	50,769		
	Total SS_{Tot}	262110,012	1800			
a. Nezávislá proměnná: (Constant), Sklon						
b. Nezávislá proměnná: (Constant), Sklon, Křivost						
c. Závislá proměnná: Rychlost						

Tab. 10. Tabulka analýzy rozptylu zpevněných komunikací (Zdroj: výzkum autora)

Modely jako celek jsou popsány tabulkami analýzy rozptylu (analysis of variance, ANOVA), viz Tab. 10 a Tab. 11. Celkový (SS_{Tot}) a regresní (SS_{Reg}) součet čtverců (SS - sum

of squares) je zde definován. Regresní počet stupňů volnosti je v případě modelu (regresní rovnice) roven počtu ovlivňujících proměnných k , v našem případě $k = 2$. Celkový počet stupňů volnosti je v případě tohoto modelu roven počtu pozorování minus jedna, tedy 1800. Je vždy dán součtem regresních a reziduálních stupňů volnosti. Podílem součtu čtverců SS a odpovídající hodnoty stupňů volnosti df jsou obdrženy tzv. průměrné čtverce (MS, Mean square). Poznamenejme, že $s^2 = MS_{Res}$ je odhadem reziduálního rozptylu a u zpevněných komunikací nabývá 50,769, resp. 19,883 u složitějšího modelu. Obdobné hodnoty je možné nalézt i u nezpevněných komunikací. Podílem regresních (MS_{Reg}) a reziduálních (MS_{Res}) průměrných čtverců je získána hodnota F-statistiky 1682,4; resp. 3124,74 s odpovídajícími stupni volnosti df , která je využívána k testu nulové hypotézy $H_0: \beta_1 = \dots = \beta_k = 0$, tedy hypotézy lineární nezávislosti Y na všech uvažovaných regresorech současně. Jelikož příslušná dosažená hladina významnosti p má hodnotu blízkou k nule (nižší než 5 %), zamítáme nulovou hypotézu H_0 na hladině významnosti $\alpha = 0,05$. Zjištěný rozdíl je tedy statisticky významný na 5% hladině. Zároveň je nutné říci, že tento výsledek není v rozporu s nevýznamností proměnné (pravděpodobně křivost) v našem regresním modelu, na kterou poukazuje výsledek odpovídajícího Waldova testu. Významností je zde totiž míněn společný vliv obou regresorů.

V následujících odstavcích je možné vidět, že tato nesrovnalost může být důsledkem multikolinearity (vzájemné korelovanosti) regresorů. Jestliže proměnnou křivost, která má nižší vypovídací hodnotu a korelaci na závislé proměnné vyřadíme z tohoto modelu, obdržíme odhad založený na modelu jednoduché lineární regrese:

$$y_i = \alpha + \beta_1 x_{1,i} + \varepsilon_i$$

V takovém případě, kdy je v modelu jediná vysvětlující proměnná, je dosažená hladina významnosti p odpovídající Waldovy t-statistiky rovna 0. I tento rozdíl je tedy statisticky významný na 5% hladině. Odhadem reziduálního rozptylu je v tomto modelu hodnota 53,234 (19,989).

ANOVA						
	Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig. (p)
Jednoduchý	Regression	7351,732	1	7351,732	367,784	,000 ^a
	Residual	11014,084	551	19,989		
	Total	18365,816	552			
Složitý	Regression	7430,039	2	3715,020	186,842	,000 ^b
	Residual	10935,776	550	19,883		
	Total	18365,816	552			
a. Nezávislá proměnná: (Constant), Sklon						
b. Nezávislá proměnná: (Constant), Sklon, Křivost						
c. Závislá proměnná: Rychlost						

Tab. 11. Tabulka analýzy rozptylu nezpevněných komunikací (Zdroj: výzkum autora)

Pokud bychom se chtěli rozhodovat pouze na základě znalosti odhadu reziduálního rozptylu, měli bychom obecně dát přednost modelu s menší hodnotou s^2 . Mezi modely multi (složitější) a linear (jednodušší) bychom tedy měli dát přednost modelu multi. Povšimněme si však, že odhady hodnoty reziduálního rozptylu s^2 byly na základě obou modelů téměř shodné. Z tohoto hlediska by měl být tedy zřejmě upřednostněn jednodušší model, který obsahuje méně parametrů.

Při zpětném pohledu k modelu multi (složitému) je jeho vysvětlovací schopnost možné posoudit na základě odhadu koeficientu determinace R^2 :

$$\hat{R}^2 = \frac{SS_{Reg}}{SS_{Tot}}$$

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
Zpevněné	,807 ^a	,652	,651	7,12523
Nezpevněné	,636 ^b	,405	,402	4,45906

a. Nezávislé proměnné: (Constant), Křivost, Sklon

Tab. 12. Koeficienty determinace pro složitější model (Zdroj: výzkum autora)

Je vidět, že složitější model vysvětluje 0,652 (0,635)²¹ celkové variability závisle proměnné. V modelu jednodušším má koeficient determinace R^2 hodnotu 0,635 (0,4) a tento model tedy vysvětluje zhruba 63 % (40 %) celkové variability.

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
Zpevněné	,797 ^b	,635	,634	7,29616
Nezpevněné	,633 ^b	,400	,399	4,47094

b. Nezávislá proměnná: (Constant), Sklon

Tab. 13. Koeficienty determinace pro jednodušší model (Zdroj: výzkum autora)

Hodnota R^2 odpovídající složitějšímu modelu s využitím křivosti je tedy o něco vyšší než hodnota odpovídající jednoduššímu, což je přirozené, neboť komplexnější model má za každých okolností vyšší vysvětlovací schopnost.

Otázkou ovšem zůstává, zda to není na úkor přílišné složitosti. Proto se zde i z tohoto hlediska patrně bude nutné přiklonit k jednoduššímu lineárnímu modelu (bez využití křivosti), neboť oba modely jsou přibližně stejně významné (viz Tab. 10 a Tab. 11) i výstižné (viz koeficienty determinace - Tab. 12 a Tab. 13), resp. odhady reziduálních rozptylů, které též zohledňují rozdílný počet parametrů a tím i složitost modelu. Závěrem proto je možné poznamenat, že uvedený vztah mezi sklonem, křivostí a rychlostí bude zobecněn na vztah sklon – rychlost.

Čím však vysvětlit, že koeficient proměnné křivost má v obou modelech oproti našemu očekávání jiné znaménko? Příčin může být několik. Jednou z nich je již dříve zmíněná multikolinearita. K té dochází v případech, kdy jsou jednotlivé nezávisle proměnné vzájemně korelovány. Naše data však nenaznačují, že proměnné křivost a sklon u zkoumaných bodů těsně souvisí a jejich vztah nemá lineární charakter. Odhadem Pearsonova korelačního koeficientu r těchto dvou proměnných je hodnota 0,2, obdobné hodnoty vykazuje i jednostranný test. Existují různá kritéria, jak posoudit míru multikolinearity. Jednoduché pravidlo říká, že k multikolinearitě dochází, přesáhne-li hodnota odhadu korelačního koeficientu hranici 0,75 pro alespoň jednu dvojici nezávisle proměnných, což je v našem případě ale nestalo.

Nejpravděpodobněji tak půjde o vysvětlení, že záporné znaménko u koeficientu křivosti bylo „způsobeno“ již při samotném terénním měření díky vlivu prvního i druhého Newtonova zákona²², kde se zvýšení či snížení rychlosti díky ak/de-celeraci neprojeví přímo na úseku

²¹ Pozn.: V závorce jsou vždy uvedeny hodnoty pro nezpevněné komunikace.

²² Obecněji bývá II. Newtonův zákon (zákon síly) vyjadřován tak, že síla F je rovna časové změně hybnosti p , což lze matematicky vyjádřit jako: $F = \frac{dp}{dt} = \frac{d(mv)}{dt} = m \cdot a$, kde F je vektor síly, m je hmotnost tělesa, a a je vektor zrychlení (Zdroj: Reichl, 2013)

s danou specifickou křivostí, ale až na úsecích incidentních (následujících), které však již mohou mít odlišnou hodnotu křivosti.

To je dáno tím, že se zrychlením tělesa (cyklisty) se mění i rychlost jeho pohybu, neboli se mění pohybový stav tělesa. Druhý Newtonův pohybový zákon tedy říká, že síla je příčinou změny pohybu, nikoli pohybu jako takového. Narozdíl od prvního pohybového zákona se tělesa, na která působí síla, nebudou pohybovat rovnoměrně přímočaře, ale jejich pohyb bude zrychlený, zpomalený, bude měnit směr, případně kombinace těchto možností.

Změna pohybu (rychlosti) závisí také na směru působící síly, jak bylo řečeno v kapitole 2.3.3. Síla ve směru (z kopce) pohybu způsobuje větší zrychlení tělesa, síla proti směru pohybu (do kopce) způsobuje zpomalení tělesa. Toto potvrzují i reálná data změřená v terénu – viz výškové profily jednotlivých tras (Příloha 12), kde je možné vidět zpoždění ve zvýšení velikosti pohybového vektoru díky změně směru síly a tím i ak/de-celeračních procesů.

Jak již bylo řečeno výše, zrychlení je derivace rychlosti neboli druhá derivace polohy, díky tomu je možné použít zákon síly k sestavení pohybové rovnice:

$$F = m \cdot \frac{d^2 r}{dt^2}$$

kteřá umožňuje řešit konkrétní pohybové děje (určovat polohu a rychlost těles v závislosti na čase), jsou-li známy konkrétní síly působící při dějích a hmotnosti těles. Právě čas je dalším faktorem, který by bylo potřeba začlenit pro ještě přesnější modelaci pohybu na PK. Konkrétně by bylo možné uvažovat např. o času stráveném na jednotlivém úseku, to však stále neřeší problém prvního Newtonova zákona – setrvačnosti, který způsobuje, že pokud je těleso uvedeno do určitého pohybu pomocí druhého Newtonova zákona, zůstává v něm (rovnoměrném přímočarém pohybu), dokud na těleso nezačnou žádné vnější síly (především síla proti pohybu cyklisty). Dochází tak k určitému zkreslení a platnosti některých předpokladů, které byly řečeny výše.

Proto oproti očekáváním může díky prvnímu i druhému Newtonovu zákonu docházet na některých úsecích, kde:

- $s > 0 \cap K > 0$ – akcelerační procesy, zvyšování velikost pohybového vektoru F_p - ~~vysoká hodnota rychlosti~~ → nízká hodnota rychlosti
- $s < 0 \cap K > 0$ – výrazné akcelerační procesy, výrazné zvyšování velikosti pohybového vektoru F_p - ~~velmi vysoká hodnota rychlosti~~ → nízká hodnota rychlosti,
- $s < 0 \cap K < 0$ – výrazné decelerační procesy, výrazné snižování velikost pohybového vektoru F_p - ~~velmi nízká hodnota rychlosti~~ → vysoká hodnota rychlosti,
- $s > 0 \cap K < 0$ - decelerační procesy, snižování velikost pohybového vektoru F_p - ~~velmi nízká hodnota rychlosti~~ → vysoká hodnota rychlosti.

Převodní matice podle trendových rovnic

Tento fakt také dokládá výsledná převodní matice, která vznikla na základě převodních rovnic uvedených výše založených na terénním výzkumu. Až na malé výjimky se hodnota křivosti na reálných úsecích PK pohybovala mezi $\langle -4,4 \rangle$. Hodnota sklonu zase v rozmezí $\langle -20,20 \%$. Výsledné rychlostní matice pro zpevněný i nezpevněný povrch ukazuje Příloha 14 jak v modelu složitém, tak také v nejhodnějším modelu určeném v následující kapitole 4.6.3. Některé hodnoty, jak je možné vidět, vykazují opačné hodnoty, než jaké byly předpokládány.

To je dáno nepřesností výše uvedeného modelu s křivostí, resp. že vliv křivosti nelze pravděpodobně takto zjednodušeně implementovat do výsledné rovnice. Celkově tedy **není možné křivost** na základě těchto výpočtů **zařadit** do výsledné trendové funkce z důvodu zbytečné složitosti celého výpočtu, z důvodu malé vypovídací hodnoty této veličiny (viz Tab. 10-13) a pak také díky odlišným předpokladům než ty, které byly očekávány na základě fyzikální podstaty problému. Její zařazení by vyžadovalo buďto využití daleko složitějších polynomiálních multiregresních modelů (ani ty by však pravděpodobně nepomohly) nebo zapojení dalších veličin - setrvačnosti, času stráveného na jednotlivých úsecích a především jejich incidenci. To však s ohledem na rozsah a možnosti této práce nebylo realizováno. Do výsledných převodních rovnic tak vstupovala pouze proměnná veličina sklon.

Díky tomuto zjednodušení bylo navíc možné určovat převodní rovnici na základě dalších jednorovnicových regresních modelů, které využívají známých typů trendových funkcí.

4.6.3 Určování trendu – převodní rovnice

K určení trendové složky se používají dva přístupy: analytický a syntetický. Analytický přístup vychází z předem známých typů trendových funkcí:

- lineární,
- parabolický (kvadratický),
- exponenciální,
- logistický,
- inverzní
- S,
- mocninná,
- Grompertzův a další.

Pro případné další srovnání byly také dopočítány do nově založených polí Speed_FT (rychlost ve směru digitalizace linie) a Speed_TF (rychlost proti směru digitalizace linie) průměrné rychlosti dle odvozených rovnic, které uvádí ve své práci i Kosarová (2003):

- stoupající úseky: $y = 0,08 x^2 - 2,05 x + 16,88$,
- klesající úseky: $y = -0,45 x^2 + 4,09 x + 17,99$,

kde y představuje sledovanou rychlost a x je sklon ve stupních. Takto byly vypočteny všechny záznamy v závislosti na orientaci linie a sklonu (stoupající x klesající), přičemž u roviny byla zadána rychlost 17,5 km/h a v případě klesání větším než $7,5^\circ$ byla upravena na 24 km/h (při větších hodnotách sklonu již vzorec nepodává adekvátní výsledky).

V další práci pak Tázlar (2012) tento terénní průzkum realizuje za pomoci stopek a tachometru a záznamu jednotlivých rychlostí do poznámkového bloku za jízdy. Výsledné převodní rovnice:

- $y = 0,1 x^2 - 2,16 x + 16,08$.

Trend dat z vlastního šetření tak má velmi podobný průběh (kvadratický) v porovnání s trendem, který popisuje ve své práci Kosarová (2003).

Při hodnocení dat negativního indexu sklonu (tj. klesajících úseků v digitalizovaném směru), kdy bylo při výběru z databáze (kromě hodnoty indexu) použito stejných parametrů, má výsledná obecná rovnice regrese tvar:

- $y = -0,23 \cdot x_2 + 2,69 \cdot x_1 + 16,11$.

V tomto případě je již rozdíl mezi dvěma trendy výraznější. U Kosarové (2003) dochází ke snížení rychlostí zhruba od sklonu 5° zatímco u Tázlara je tento trend pomalejší. Dané omezení rychlosti je důsledkem větší obezřetnosti (dostatečné zpomalení) při sjezdu prudších kopců. I zde bylo ve srovnání s Kosarovou (2003) provedeno šetření na kratších segmentech, a proto jsou obecně dosahovány nižší rychlosti. Pro rovinné segmenty byla vzhledem k výše uvedeným rovnicím stanovena průměrná rychlost 16,1 km/h, protože této hodnotě se blíží výsledky obou rovnic při zvoleném sklonu 0.

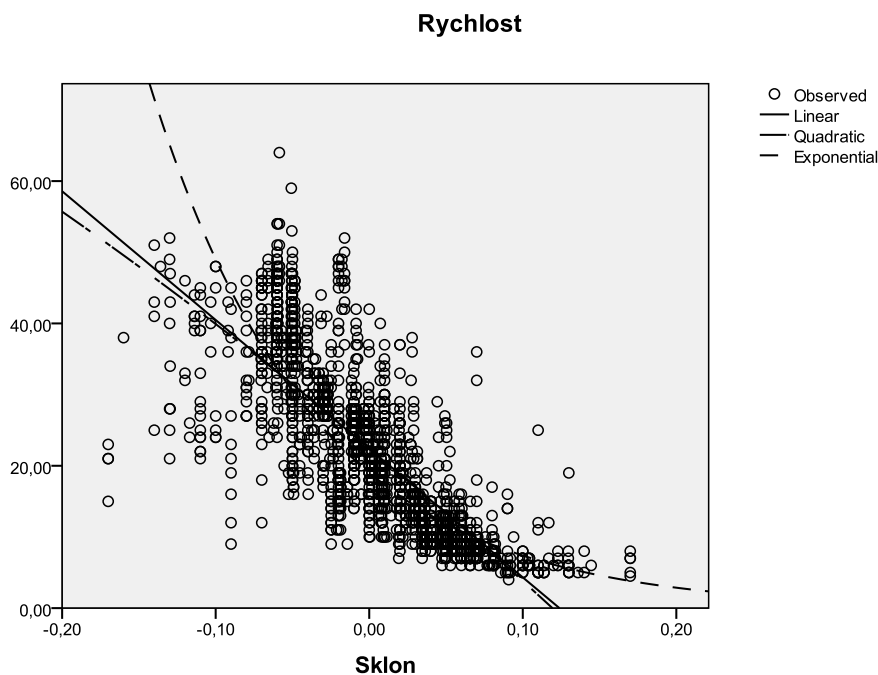
Jak je výše naznačeno, tyto práce rozlišovaly úseky dle sklonitosti a počítaly pouze s jednou převodní rovnicí pro všechny druhy terénu. Veškeré úpravy, tj. jak modifikace samotného modelu tak také úprava samotné sítě PK, se pak dělaly ručně, proto bylo nutné tento proces zpřesnit a zautomatizovat.

Ke stanovení zvoleného trendu byl opětovně vybrán koeficient determinace $R^2 = 1 - \frac{Se}{St}$, kde Se je reziduální a St celkový součet čtverců. V modelu lineární regrese s absolutním členem leží hodnota R^2 v intervalu $\langle 0, 1 \rangle$. V případě rovnosti či podobnosti koeficientů byla vybrána funkce s nejjednodušším průběhem (nejméně parametrů).

Využití logaritmické, mocninné a logistické křivky nepřípadalo v úvahu z důvodu výskytu záporných hodnot u nezávislé proměnné sklon. Využití inverzního a S trendu zase nebylo možné z důvodu výskytu nulových hodnot. Pro výběr optimální trendové funkce sklonu (s) tak byly zvoleny tři základní modely (viz níže) díky jejich relativní jednoduchosti a snadnému zápisu pomocí trendových (T) převodních rovnic, kde x_0, x_1, x_2 jsou hledané parametry:

- **lineární:** $Tr_{lin(s)} = x_0 + x_1 \cdot s$, variatně s křivostí (viz kap. 4.6.2): $Tr_{lin(s,K)} = x_0 + x_1 \cdot s + x_2 \cdot K$,
- **kvadratický (parabolický):** $Tr_{kvad(s)} = x_0 + x_1 \cdot s + x_2 \cdot s^2$,
- **exponenciální:** $Tr_{exp(s)} = x_0 \cdot x_1^s$

Trend pro zpevněné komunikace:



Obr. 32. Zobrazení trendových křivek pro zpevněné komunikace (Zdroj: výzkum autora)

Trendové převodní rovnice pro všechny zjednodušené modely rychlost-sklon u zpevněných komunikací:

- lineární: $y = -180,83 x_1 + 22,4$
- kvadratická: $y = 22,61 - 180,53 x_1 - 75,45 x_1^2$,
- exponenciální: $y = 19,03 \cdot (-9,45)^{x_1}$

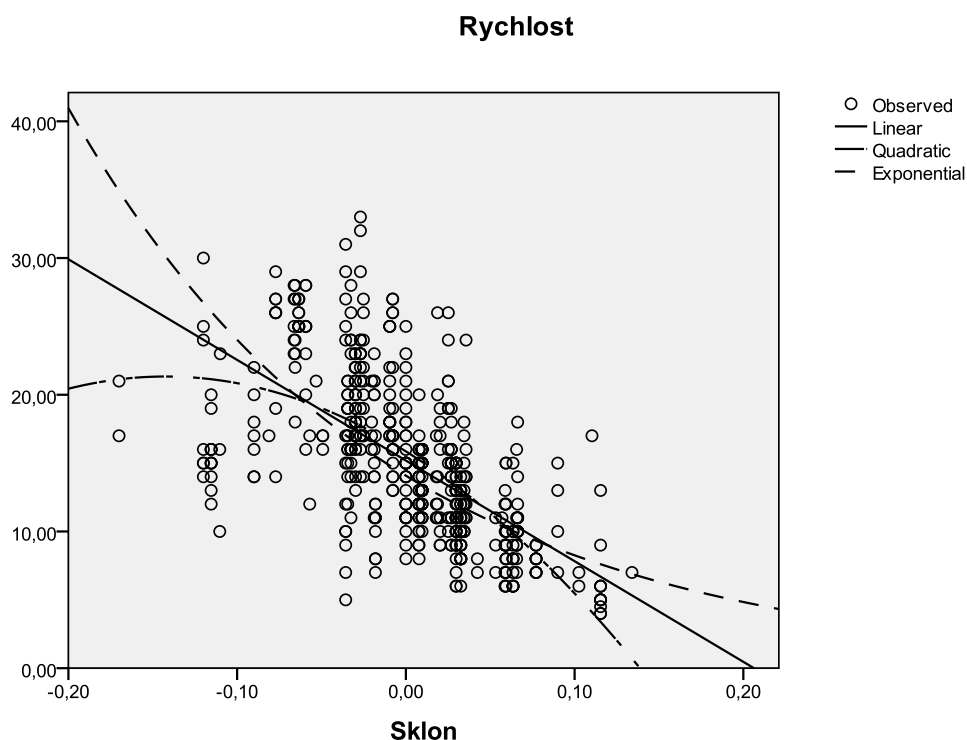
Zobrazení křivek pro jednotlivé trendové funkce u zpevněných PK vizualizuje graf závislosti rychlost – sklon na Obr. 32 výše.

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
Lineární	,797	,635	,634	7,296
Kvadratický	,797	,635	,635	7,292
Exponenciální	,838	,702	,702	,328

Tab. 14. Hodnocení přesnosti regrese jednotlivých modelů u zpevněných PK (Zdroj: výzkum autora)

Nejpřesnější hodnoty koeficientu determinace vykázal exponenciální trend (viz Tab. 14). Exponenciální trend volíme v případě, kolísá-li koeficient růstu kolem nenulové hodnoty, což by mělo odpovídat i tomu, že rychlost nemůže nabývat záporných hodnot.

Trend pro nezpevněné komunikace:



Obr. 33. Zobrazení trendových křivek pro nezpevněné komunikace (Zdroj: výzkum autora)

Trendové převodní rovnice pro všechny zjednodušené modely rychlost-sklon u nezpevněných komunikací:

- lineární: $y = -73,61x_1 + 15,18$,
- kvadratická: $y = 15,85 - 76,87 x_1 + -269,82 x_1^2$,
- exponenciální: $y = 14,08 \cdot (-5,33)^{x_1}$

Zobrazení křivek pro jednotlivé trendové funkce u nezpevněných PK ukazuje graf závislosti rychlost – sklon na Obr. 33 výše.

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
Lineární	,633	,400	,399	4,471
Kvadratický	,657	,431	,429	4,357
Exponenciální	,661	,436	,435	,301

Tab. 15. Hodnocení přesnosti regrese jednotlivých modelů u zpevněných PK (Zdroj: výzkum autora)

I u nezpevněných komunikací nejpřesnějších hodnot koeficientu determinace vykázal exponenciální trend, jak dokazuje Tab. 15. V porovnání se zpevněnými komunikacemi však nenabýval u záporných hodnot sklonu takové konvergence (Obr. 32 a 33), což by mělo i reálně odpovídat tomu, že u nich dochází k větší akceleraci a dosahování vyšších hodnot pohybového vektoru nežli u nezpevněných komunikací převedším u záporných hodnot sklonu.

Nevýhodou exponenciálního trendu je však nutnost omezit funkční hodnoty shora u nejnižších hodnot sklonu (záporných), aby nedocházelo k výpočtu extrémních rychlostí při jízdě v prudkých klesáních, především u zpevněných komunikací, kde křivka konverguje k nekonečnu značně rychleji. Na základě terénního průzkumu a dosažených maximálních rychlostí (viz pozorované hodnoty v grafech na Obr. 32 a 33) byla max. rychlost nastavena na 60 km/h u zpevněných komunikací a teoreticky na 40 km/h u nezpevněných, což se následně ukázalo jako zbytečné. Naopak u lineární a kvadratické funkce bylo potřeba nastavit omezení zdola, aby nedocházelo k výskytu záporných hodnot rychlosti při vysokých hodnotách sklonu (jízde do prudkých kopců). To bylo realizováno na základě podmínky nejnižší průměrné rychlosti chůze do kopce = 0,79 km/h (FTK UPOL, 2012), kde tato rychlost byla počítána na základě terénního průzkumu v kopcovitém reliéfu, za který byla považována hodnota vyšší 10 %, což by mělo i na základě Obr. 32 a 33 být odpovídající hodnota.

4.7 Výpočet času

Pro výpočet celkového ohodnocení vybrané cesty v grafu je důležitý vektor $P = (p_1, p_2, \dots, p_n)$, který se skládá z ohodnocení jednotlivých úseků a zohledňuje parametry, které rozhodují o porovnání kvality dvou cest v grafu. V jednoduchém případě se může jednat o jednosložkový vektor obsahující pouze délku, některé postupy ale mohou zohledňovat více kritérií zároveň jako v našem případě, kdy budeme zohledňovat právě typ povrchu.

Z důvodu možné aplikace v síťových analýzách bylo třeba každý prvek sítě řádně ohodnotit. Vedle důležité hodnoty vyjadřující délku určitého segmentu (např. pro hledání nejkratší cesty) po povrchu, která se však neměnila, bylo nutné určit i jeho časovou náročnost, která umožní nalézt nejrychlejší trasu nebo modelovat časovou dostupnost určitého místa apod. Veličinu lze snadno vypočítat z rovnice:

$$s = v \cdot t$$

kde t je čas, s povrchová délka úseku a v průměrná rychlost.

Výsledný čas byl vypočten v závislosti na proměnné - průměrná rychlost, která záležela na typu povrchu komunikace, uvedeném převodním vzorci a na využití různých metodik k určování morfometrických parametrů, které byly následně testovány v základních síťových analýzách v prostředí GIS.

4.8 Algoritmizace

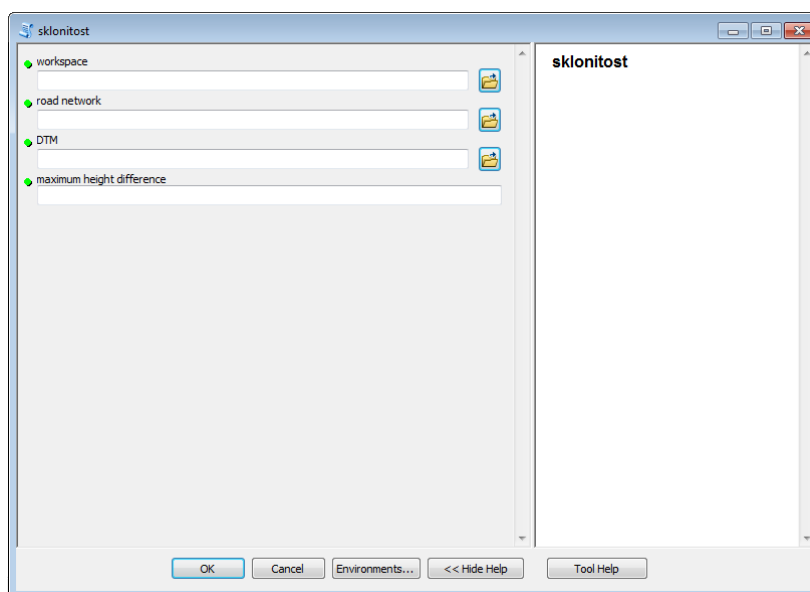
Pro potvrzení funkčnosti dané metodiky bylo potřeba ji ověřit na základě algoritmizace daného postupu ve výše uvedeném jazyku a vytvořit toolbox pro SW ArcGIS. Zároveň je třeba říci, že výsledný toolbox by měl být programován tak, aby mohl mít všestranné využití a nebyl limitován pouze vstupními datovými sadami uvedenými v této práci, tzn. aby bylo možné vypočítat průměrný sklon a křivost každého liniového úseku na základě využití libovolného rastrového DMR.

Tvorba toolboxu pro SW GIS

Zjednodušený chod skriptu a návod na postup pro využití toolboxu je popsán v následujících pasážích.

Načtení vstupních dat:

- souborové úložiště, kam se uloží výsledná vrstva komunikací (workspace),
- vrstva komunikací (road network), formát: pouze liniové prvky, shapefile,
- digitální model reliéfu (DTM), formát: pouze rastrová data,
- parametr prahové hodnoty h (maximum height difference), formát: reálná čísla (metry) z množiny R^+ .



Obr. 34. Dialogové okno nástroje Sklonitost (Zdroj: výzkum autora)

Další zjednodušený chod skriptu:

- Přidání polí – skript načte vstupní vrstvy a přidá do ní nová pole.
- Výpočet sklonu a křivosti a určení orientace linie – skript načte vstupní vrstvy, do kterých byly v předešlém kroku přidány pole, provede výpočty, příp. rozdělí linie (změní geometrii) a výsledné hodnoty zapíše do přidávaných polí.

Výsledkem tohoto postupu je nově vytvořená vrstva v případě, dojde-li ke změně její geometrie, nebo modifikovaná vstupní vrstva komunikací s vypočtenými hodnotami morfometrických parametrů. Celý nezjednodušený postup je uveden v kap. 4.8.1 a 4.8.2 v podobě matematického zápisu algoritmu, textového popisu a schematicky - Příloha 15 – konceptuální model postupu tvorby korektně ohodnocené datové sady.

4.8.1 Matematický zápis

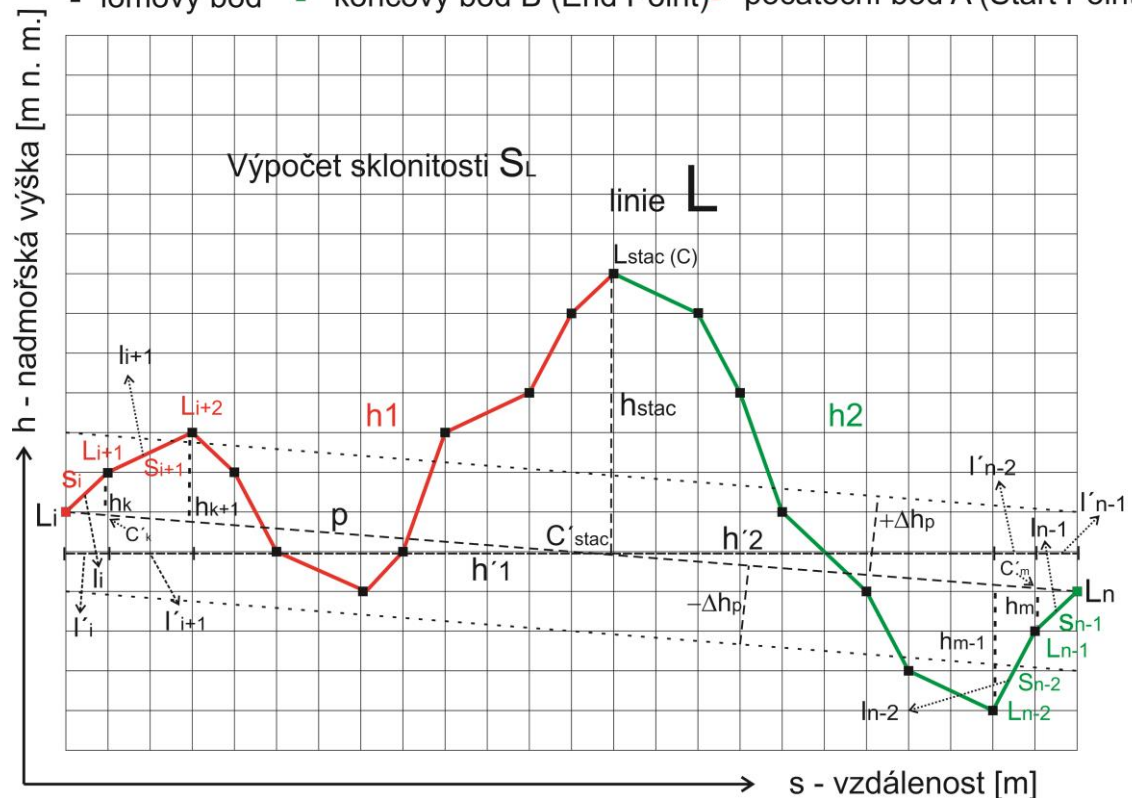
Definováno:

$L...$	délka původní linie	$L_i ...$	lomové body s nadmořskou výškou	$l_i...$	délka segmentu linie ($l_i'...$ ve 2D rozměru)
$s_i...$	sklon úseku (segmentu)	$K_i...$	křivost úseku (segmentu)	$S_L...$	celkový sklon linie
$K_L...$	celková křivost linie	$v...$	průměrná rychlost	$k_i...$	převodní koeficienty
$P...$	povrch linie (komunikace)	$h_{i,...,n} ...$	délka nové linie ($h' ...$ ve 2D rozměru)	$C'_i ...$	nadmořská výška průmětu na zemskou plochu

$h_{k,...,m} ...$ prahové vzdálenosti bodů

$h_p...$ nastavená prahová vzdálenost

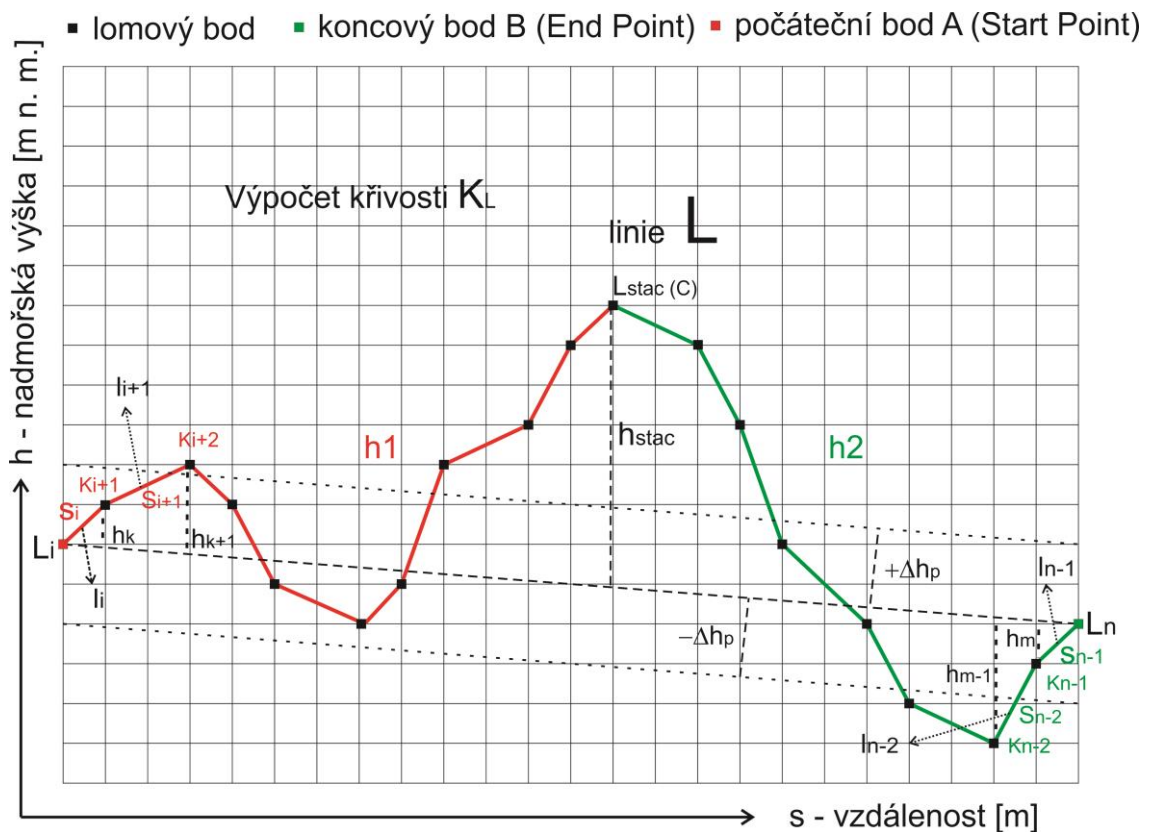
- lomový bod
- koncový bod B (End Point)
- počáteční bod A (Start Point)



Obr. 35. Ilustrace průběhu linie a matematického zápisu algoritmu pro výpočet sklonu (Zdroj: výzkum autora)

1. $\forall L_i \in L; i = 1, \dots, n - 1; L \in R^+, \text{přidělit } h \rightarrow L_i, n = \max i$
2. Vytvořit spojnici $L_i - L_n, \forall L_i \in L, L_{i+1}, \dots, L_{n-1}$, vypočítat nadm. výšku $C'_k, k = 1, \dots, m$
3. dle vzorce např. pro $C'_{stac} = \frac{L_i * h'_2 + L_n * h'_1}{L}$
4. Vypočítat $h_k, k = 1, \dots, m$, dle rozdílu $|L_{i+1} - C'_k|$, seřadit h_{stac}, \dots, h_{min}
5. Vybrat $h_{stac}, h_{stac(k)} = h_{\max(k)}, k = 1, \dots, m$
6. Porovnat $|h_{stac}|$ a Δh_p
7. Jestliže $|h_{stac}| > \Delta h_p$, rozdělit L v $L_{stac} \rightarrow$ vytvořit h_1 a $h_2, h_1 + h_2 = L$.
Vytvořit novou geometrii (linie h_1 a h_2), pokračovat rekurzivně v krocích 1-6 pro nově vytvořené linie h_1 a h_2 , dokud $|h_{stac}| < \Delta h$

8. Jestliže $|h_{stac}| < \Delta h$, pokračovat rekurzivně v krocích 1-7 pro další linii.
9. $\forall S_i \in L; i = 1, \dots, n-1; L \in R^+$, přidělit s_i segmentu (L_i a L_{i+1}), $s_i = \frac{L_{i+1}-L_i}{l_i}, i = 1, \dots, n-1$
10. Vypočítat S_L (Jestliže $|h_{stac}| > \Delta h_p$, $L = h_i$, $i =$ počet nově vytvořených linií), dle vzorce: $S_L = \sum_{i=1}^n \frac{l_i \cdot s_i}{l_i} = \frac{s_i \cdot l_i + s_{i+1} \cdot l_{i+1} + \dots + s_{n-1} \cdot l_{n-1} + s_n \cdot l_n}{l_i + l_{i+1} + \dots + l_{n-1} + l_n}$, $l_i =$ délka segmentu po povrchu, $l_i = \sqrt{h_k^2 + l_i'^2}$, $l_i' =$ délka segmentu ve 2D rozměru
11. Vytvořit nové pole FT, TF a Křivost (Curvature), vypočítat hodnotu L_i a $L_n, i = [1, n]$; přiřadit s_H (nebo h_1) do FT, $-s_H$ (nebo h_1) do TF
12. $\forall K_i \in L; i = 1, \dots, n-1; L \in R^+$, přidělit K_i lomovému bodu L_i , $K_i = s_i - s_{i+1}, i = i+1, \dots, n-1$



Obr. 36. Ilustrace průběhu linie a matematického zápisu algoritmu pro výpočet křivosti (Zdroj: výzkum autora)

13. Vypočítat K_L ,
dle vzorce: $K_L = \sum_{i=1}^n \frac{(l_i + l_{i+1}) \cdot (s_i - s_{i+1})}{2 \cdot (L - (l_i + l_n))} = \frac{(l_i + l_{i+1}) \cdot (s_i - s_{i+1}) + (l_{i+1} + l_{i+2}) \cdot (s_{i+1} - s_{i+2}) + \dots + (l_{n-2} + l_{n-1}) \cdot (s_{n-2} - s_{n-1}) + (l_{n-1} + l_n) \cdot (s_{n-1} - s_n)}{2 \cdot (l_i + l_{i+1} + \dots + l_{n-1} + l_n - (l_i + l_n))}, i = 1, \dots, n-1$
Jestliže $|h_{stac}| > \Delta h_p$, $L = h_i$, $i =$ počet nově vytvořených linií.
14. Přiřadit K_L do atributového pole Křivost.
15. Jestliže P = zpevněný, převést na rychlost v_z (rychlost na zpevněném povrchu),
 $v_z = k_1 \cdot S_L + k_2 \cdot K_L + k_3$
Jestliže P = nezpevněný, převést na rychlost v_n (rychlost na nezpevněném povrchu),
 $v_n = k_4 \cdot S_L + k_5 \cdot K_L + k_6$
16. Vytvořit pole Speed-TF a Speed-FT, Přiřadit v_z a v_n do Speed-FT a Speed-TF.

17. Vytvořit pole Time-TF a Time-FT, Vypočítat čas dle vzorce: $t = \frac{s}{v}$ s... povrchová délka linie a $v = v_z \cup v_n$.
18. Rekurzivně pokračovat v bodech 9-15 pro všechny linie. Ukončit algoritmus.

4.8.2 Textový popis

Prohledat všechny lomové body (kromě Start Pointu A - L_i a End pointu B - L_n linie a ke každému přiřadit informaci o jeho nadmořské výšce, tu uložit do mezipaměti.

```
# Step through each vertex in the feature
#
for pnt in feat.getPart(partnum):
    point = Point()
    if pnt:
        # Print x,y coordinates of current point
        #
        print pnt.X, pnt.Y
        point.x = pnt.X
        point.y = pnt.Y
        point.z = float(str(arcpy.GetCellValue_management(dtm, str(point.x) + " " + str(point.y)).getOutput(0)).replace(",","."))
        points.append(point)
        print point.z
    else:
        # If pnt is None, this represents an interior ring
        #
        print "Interior Ring:"
```

Vypočítat nadmořské výšky bodů na této spojnici za pomoci vzorce vážených protějších vzdáleností linií: [nadmořská výška bodu A * vzdálenost h'_2 (B—C') + nadmořská výška bodu B * vzdálenost h'_1 (A—C')] / celková délka linie L (h_1+h_2).

Určit výškovou vzdálenost (rozdíl nadmořské výšky) každého z bodů L_i od C'_i , tj. pomyslné spojnice Start (A) a End Pointů (B), aproximované přímkou nadmořských výšek Start a End Pointu – p) a seřadit body podle výše rozdílu.

```
for p in points[1:-1]:
    b = p
    len_seg = math.sqrt((b.x - a.x)**2 + (b.y - a.y)**2)
    len_count += len_seg

    C_ = ((A.z * (length - len_count)) + (B.z * len_count))/length
    print "C_ " + str(C_)
    print "dif " + str(abs(p.z - C_))
```

Vybrat bod s nejvyšší hodnotou rozdílu – stacionární/inflexní (kritický) bod C (L_{stac}). Porovnat tuto hodnotu s předem nastavenou hraniční hodnotou (Δh_p) významnosti rozdílu nadmořských výšek, která byla stanovena na v případě této práce optimálně na 5 m.

```
if abs(p.z - C_) > dif:
    dif = abs(p.z - C_)
    stac_pt = p
else:
    pass
```

Pokud bude vzdálenost CC' větší než $\Delta h_p = 5$ m, rozdělit linii v bodě a zachovat informace o primárním klíči linie.

```
if dif > min_h:
    in_pnt = arcpy.Point()
    in_pnt.X, in_pnt.Y = stac_pt.x, stac_pt.y
    in_row = in_cur.newRow()
    in_row.shape = in_pnt
    in_cur.insertRow(in_row)
```

```

print "SPLIT POINT"
field = "ROAD_ID"
print row.getValue(field)
split = 1
i += 1

```

Pokračovat rekurzivně dále v krocích pro nově vytvořené linie až do doby, kdy žádný bod nebude mít větší nežli hraniční prahová hodnota (na linii již nebude existovat žádný kritický bod).

```

del cur, in_cur
if split == 1:
    arcpy.Snap_edit(split_points,[[roads,"VERTEX","30 METERS"]])
    shp += 1
    arcpy.SplitLineAtPoint_management(roads,split_points,arcpy.env.workspace + "\\roads_new" +
str(shp) + ".shp")
    arcpy.Delete_management(split_points)
    return splitLines(arcpy.env.workspace + "\\roads_new" + str(shp) + ".shp",dtm,min_h,shp)
else:
    return str(shp)

```

Pokud bude rozdíl nadmořských výšek nižší než hraniční hodnota $\Delta h_p = 5$ m, ukončit prohledávání této linie a projít rekurzivně všechny další až do konce prohledání celé sítě.

```

else:
    return str(shp)

```

Vytvořit nová atributová pole – FT (from-to) a TF (to-from) a pole Křivost (Curvature) s definovaným datovým typem podporující min. reálná kladná čísla - double.

```

arcpy.AddField_management(roads,"FT","DOUBLE")
arcpy.AddField_management(roads,"TF","DOUBLE")
arcpy.AddField_management(roads,"CURVATURE","DOUBLE")

```

Rekurzivně prohledat všechny segmenty nově vytvořených linií (ve směru od počátečního do koncového bodu) a přiřadit jim hodnotu sklonu vypočteného na základě výše uvedeného vzorce. Rozdíl nadmořských výšek počítat vždy tak, že hodnota počátečního bodu (začínat již u StartPointu a pokračovat až do EndPointu) bude odečtena od hodnoty bodu následujícího proto, aby hodnota sklonu byla dle normy ČSN 73 61 01, tj. z kopce záporná a do kopce kladná.

```

# Step through each vertex in the feature
#
for pnt in feat.getPart(partnum):
    point = Point()
    if pnt:
        # Print x,y coordinates of current point
        #
        print pnt.X, pnt.Y
        point.x = pnt.X
        point.y = pnt.Y
        point.z = float(str(arcpy.GetCellValue_management(dtm, str(point.x) + " " +
str(point.y)).getOutput(0)).replace(",","."))
        points.append(point)
        print point.z
    else:
        # If pnt is None, this represents an interior ring
        #
        print "Interior Ring:"
    partnum += 1

```

Vypočítat celkový sklon linie podle vzorce pro všechny nově vytvořené linie. Sklon bude vypočten na základě váženého průměru délky jednotlivých segmentů linie (délka segmentu po povrchu * sklon segmentu / celková délka linie po povrchu). Délku segmentu po povrchu vypočítat na základě Pythagorovy věty, kde je přeponou pravoúhlého trojúhelníku a odvěsny tvoří délka segmentu ve 2D rozměru a rozdíl nadmořských výšek počátečního a koncového bodu segmentu.

```

for j in range(len(points) - 1):
    a = points[j]
    b = points[j+1]
    len_seg = math.sqrt((b.x - a.x)**2 + (b.y - a.y)**2)
    delta_h = abs(b.z - a.z)

```

```

len_seg_surf = math.sqrt(len_seg**2 + delta_h**2)

len_surf_count += len_seg_surf

print "len_seg " + str(len_seg)
print "len_seg_surf " + str(len_seg_surf)

slope_j = (b.z - a.z)/len_seg_surf
print "slope_seg " + str(slope_j)

slope.append(slope_j)

len_array.append(len_seg_surf)
slope_sum += slope_j*len_seg_surf

```

Určit směr orientace linie pomocí určení First a End Pointu, přiřadit těmto bodům nadmořskou výšku – přiřazení hodnoty sklonu pro směry: hodnotu vypočteného celkového sklonu linie přiřadit k atributu FT, k atributu TF přiřadit hodnotu opačnou, tj. vynásobit ji $\cdot(-1)$.

```

row.FT = slope1
row.TF = slope1 * (-1)

```

Výpočet křivosti bude určen na základě informací o sklonitosti jednotlivých segmentů i linie samotné. K jednotlivým mezilehlým bodům bude iterativně přiřazována hodnota křivosti, která bude vypočtena jakožto diferenciál (rozdíl) sklonitosti okolních 2 segmentů.

```

for k in range(len(slope) - 1):
    curvature += ((len_array[k] + len_array[k+1])*(slope[k] - slope[k+1]))

```

Jednotlivé hodnoty křivosti mezilehlých bodů budou pro výpočet výsledné hodnoty váženy okolními 2 segmenty (součtem jejich povrchových vzdáleností). Vzhledem k tomu, že vnitřní mezilehlé segmenty budou ve výpočtech vždy váženy 2x, je nutné celkový vážený průměr vydělit dvojnásobkem celkové vzdálenosti linie bez krajních 2 segmentů, které figurují ve výpočtech vždy jen jednou). Výpočet probíhá pro linie s více než 2 segmenty (jinak $K = 0$).

```

if len(slope) > 2:
    curvature = curvature/(2*(len_surf_count) - (len_array[0] + len_array[-1]))
    print "curvature " + str(curvature)
    row.CURVATURE = curvature
    cur.updateRow(row)

```

Vytvořit dvě nová atributová pole Speed-TF a Speed-FT. Výsledné hodnoty sklonu a křivosti převést dle stanovené převodní rovnice, která bude vybrána na základě informace o povrchu komunikace na průměrnou rychlost pro každý směr linie a přiřadit je do atributových polí Speed-TF a Speed-FT.

Vytvořit dvě nová atributová pole Time-TF a Time-FT a podle známého vzorce ($s = v * t$) jim přiřadit celkovou časovou hodnotu pro dobu jízdy po/proti směru orientace linie.

V algoritmu implicitně neimplementováno z důvodu nutnosti případné orientace na jednu datovou sadu a vybrané převodní rovnice. Tyto kroky je možné provést odděleně a automatizovaně pomocí základních výpočtů nad geometrií celé sítě za využití funkcí atributové algebry (kalkulačky). Zároveň je tak možné i vyzkoušet veškeré převodní rovnice a jejich různé kombinace s využitím dalších atributů jako je např. atribut typu povrchu apod.

Vypočítat dobu běhu algoritmu a ukončit jej.

```

seconds = time.time() - start_time
m, s = divmod(seconds, 60)
h, m = divmod(m, 60)
print "DONE IN %d:%02d:%02d" % (h, m, s)

```

5 APLIKACE A HODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Hodnocení algoritmu proběhlo na datech ve zmíněné lokalitě, jež byla popsána v kap. 4.6.1. Algoritmus byl aplikován s různými hodnotami vstupního parametru (viz kap. 5.1) a bylo zjišťováno, jak se tato variantní nastavení projeví na obdržných výsledcích, jak vizuálně, tak i přímo v reálných hodnotách z terénu, modelovaných reliéfů a následně také v síťových analýzách. Hodnot, které může parametr nabývat je mnoho, nicméně z již realizovaných měření bylo určeno několik signifikantních intervalů pro toto území, při kterých bylo dosahováno obstojných hodnot. K demonstraci základní funkcionality algoritmu tak postačí i relativně malé množství příkladů. Zároveň bylo v tomto ohledu důležité navázat na předchozí práce provedené na toto téma a srovnat výsledky algoritmu se staršími metodikami, jak z oblasti samotných dostupnostních modelů (tzn. především implementovat další převodní rovnice při zachování daných pravidel), tak také z oblasti samotného způsobu výpočtu morfometrických parametrů DMR, tzn. za využití současně používaných metodik pro výpočet sklonitosti liniových prvků (silniční sítě). Výpočet křivosti liniového prvku bohužel díky neexistenci předchozích metodik žádné srovnání neměl.

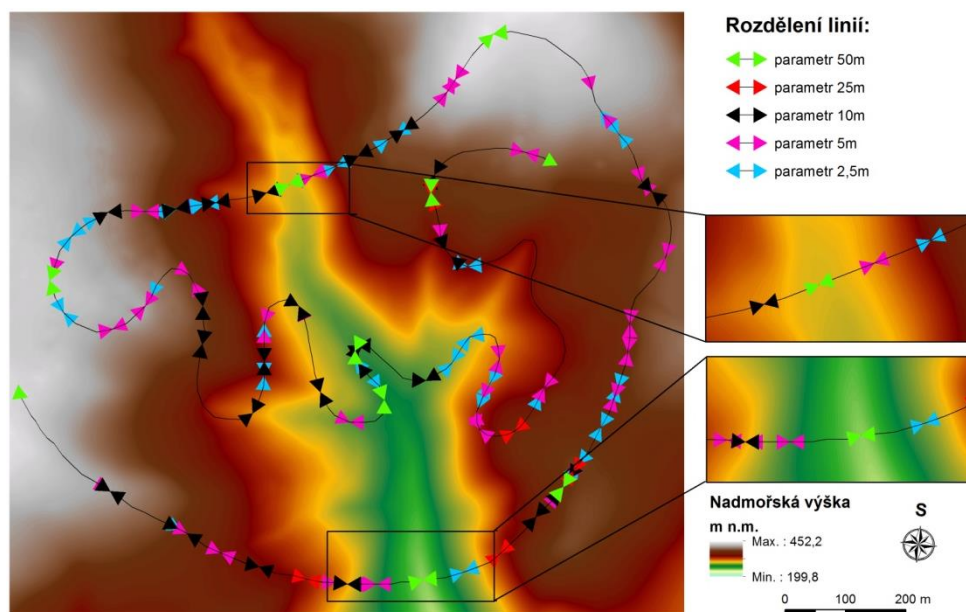
Nejprve byly srovnávány jednotlivé dostupnostní modely, z nichž byl následně vybrán ten nejpřesnější, který poté byl využit a srovnáván s dalšími metodikami pro výpočet sklonitosti silniční sítě. Došlo tak k maximální optimalizaci a kalibraci výpočtových schémat, kde byla nakonec určena nejpřesnější metodika výpočtu morfometrických charakteristik včetně kalibrování prahové hodnoty a zároveň také k této metodice přidán výsledný nejpřesnější model dostupnosti cyklistické dopravy pro zpevněné a nezpevněné komunikace zvlášť.

Všechny výsledky jsou prezentovány ve formě tabulek umístěných v přílohách této práce. Další výstupy, které byly do příloh zařazeny, jsou samotné morfometrické charakteristiky zjištěné přímo v terénu u jednotlivých tras a u charakteristických geomorfologických tvarů reliéfu. U jednotlivých tras byly porovnávány hodnoty vypočtené SW BaseCamp od společnosti Garmin s hodnotami vypočtenými na základě navržené metodiky s využitím algoritmu v prostředí GIS.

Interpretace výsledků a jejich zhodnocení je předmětem následujících podkapitol.

5.1 Parametr h

Jak již bylo řečeno výše, testování parametru h probíhalo na několika úrovních a typů vstupních dat. Na modelové silniční síti při nastavení velikosti parametru na vyšší hodnoty nedošlo k téměř žádnému rozdělování linie, tj. vyhledání kritických bodů. To je dáno, kromě toho, že se jedná poměrně o vysokou hodnotu, také tím, že silniční a cestní síť je v této lokalitě poměrně zahuštěna, a tak jednotlivé délky úseků PK nedosahují takových hodnot. Konkrétně ve zkoumané oblasti to bylo průměrně 151,25 m na úsek. Zároveň byl také parametr testován na náhodně vytvořených liniových prvních s různým průběhem, jak dokazuje Obr. 37.



Obr. 37. Vizuální testování přesnosti parametru h (Zdroj: výzkum autora)

Výše uvedený obrázek demonstruje funkčnost algoritmu na jednotlivě náhodně vytvořených liniích s různým průběhem, délkou a počtem lomových bodů. Nejméně kritických bodů detekuje metodika s parametrem $h = 50$. Každé další snižování parametru zvyšuje počet detekovaných kritických bodů, tzn., že kritické body vzniklé s vyšší hodnotou parametru jsou vždy min. shodné s těmi vzniklými s nižší hodnotou h , jak dokumentuje Obr. 37 výše. Nejdříve jsou definovány kritické body s parametrem $h = 50$ (černě) a pak u každé další vrstvy přibývají další barevně označené. Tzn., potvrdila se základní funkčnost tohoto parametru, že při každém dalším zmenšování jeho velikosti se počet detekovaných bodů minimálně rovná (většinou je však vyšší) počtu předchozímu a že všechny detekované body, obsažené u vyšší hodnoty h , jsou obsaženy i u výsledné vrstvy získané při zadání nižší hodnoty parametru.

5.2 Detekce kritických bodů

Testování detekce kritických bodů do jisté míry souvisí s výše uvedeným parametrem h a nastavením jeho hodnoty. Metodika byla testována na uměle vytvořených výškových profilech, které by měly reprezentovat jednotlivé geomorfologické útvary uvedené v kapitole 2.3.2, u nichž je známá jeho velikost křivosti a zároveň také je možné určit relativní přesnost lokalizace kritického bodu, tzn. na většině útvarů jsou vidět zmiňovaná globální/lokální maxima či minima nebo body inflexe, příp. další významné body definované v kapitole 4.3.1. Zároveň také byly definovány i další geomorfologické útvary, u kterých by mohlo dojít potenciálně k selhání daného postupu.

Metodika testování byla založena na určení velikosti prahové hodnoty h u jednotlivých útvarů při detekci prvního kritického bodu a její následné vynesení na výškový graf každého liniového morfologického útvaru. Ten byl vytvořen SW ArcGIS pomocí extenze 3D Analyst. Jednotlivé výškové grafy ukazuje Příloha 8. U většiny geomorfologických tvarů došlo k detekci kritických bodů v očekávaných místech. Často se nejednalo přesně o body globálních maxim či minim, ale o místa jím blízká, povětšinou místa, kde dochází k větší změně sklonu, tzv. úpatnicím. Toto bylo dáno zmiňovaným využitím nekollmé vzdálenosti na spojnici počátečního

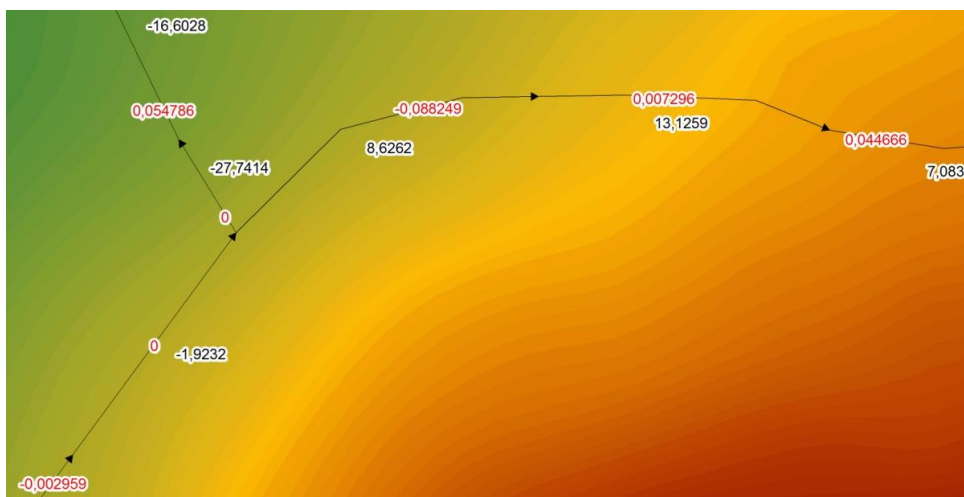
a koncového bodu, kdy při vyšší „nakloněnosti“ dané spojnice (počátečního a koncového bodu) může dojít právě k detekci bodu, který není bodem stacionárním, ale je buďto bodem inflexním nebo bodem, kde dochází povětšinou k signifikantní změně sklonu. Tuto situace asi nejlépe vystihuje určení kritického bodu u geomorfologického útvaru – „část úvalu“, kde je patrné, že bod je více posunut z oblasti plynulého přechodu do oblasti, kde je tento přechod více stupňovitý, stejně tak tomu je i v případě u útvaru údolnice. Velmi přesně proto proběhla detekce u geomorfologického tvaru „hora“, kde je tento přechod největší. Za zmínku ještě také stojí výsledek podaný při detekci kritického bodu u vrstevnice. Tam by teoreticky nemělo dojít k detekci v žádném případě, nicméně ani přes „obtažení“ vrstevnice nedokázal SW GIS přiřadit celé linii stejnou hodnotu nadmořské výšky, jak dokazuje i Příloha 8, kde došlo k detekci kritického bodu při nastavení parametru na hodnotu 0,2 m, což může mj. také být způsobeno nepřesností gridového DMR a především interpolační metodiky, nicméně i tento výsledek lze považovat za úspěšný, jelikož tento problém je možné řešit prostým nastavením parametru h na vyšší hodnoty, kde již nedocházelo k detekci žádného bodu u vrstevnic. U dalších útvarů pak body ležely v místech, kde byly očekávány, a tak lze metodiku detekce kritických bodů považovat za poměrně úspěšnou.

5.3 Výpočet hodnot sklonu a křivosti

Vzhledem k tomu, že metodika výpočtu sklonu byla pouze zpřesňující technikou stávající používaných metod, které již povětšinou nabízí přijatelné výsledky, byla testována především nově zakomponovaná část s určením její orientace.

Většina hodnot sklonu odpovídala skutečným hodnotám reálně naměřeným v terénu, jak dokazuje terénní průzkum a níže uvedené Obr. 38 a Obr. 39. Vzhledem k absenci objektivních hodnotících algoritmů bylo potřeba alespoň vizuálně na podkladu DMR a se zobrazením hodnot sklonu a směru orientace linie zhodnotit reálnost dosažených výsledků.

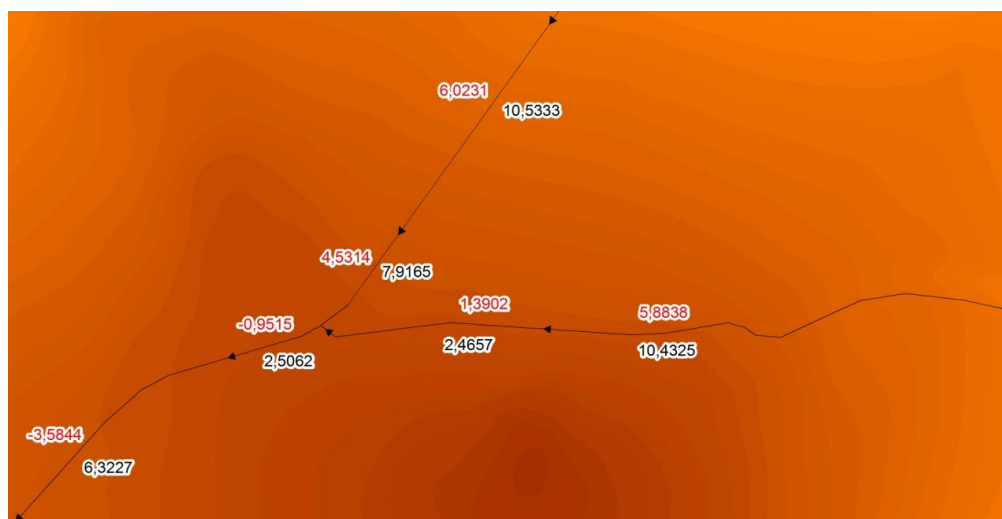
Na zkoumaném území nebyla nalezena ani jedna linie s potenciálně špatně ohodnocenou orientací. Co se týče výše hodnoty sklonu, ani zde povětšinou nedocházelo k chybnému určení, avšak reálná hodnota výšek sklonu by samozřejmě vyžadovala uskutečnit terénní průzkum GPS kampaní. Důležité je mít na paměti, že velikost byla dána díky váženému průměru délky jednotlivých segmentů linie, proto pravděpodobně nejpresnějších výsledků dosahovaly linie s vyšším počtem lomových bodů s pravidelným rozmístěním, méně přesné pak linie s nepravidelným rozmístěním lomových bodů a nejméně přesná pravděpodobně byla metodika u linií, které jsou tvořeny pouze dvěma body, tj. pouze jedním segmentem. Z celého zkoumaného území většina linií vykazala hodnoty sklonu do 20 %, na projetych trasách maximálně 17 %. Obr. 38 níže zobrazuje jediný úsek, který dosáhl hodnoty vyšší, konkrétně – 27 %.



Obr. 38. Testování funkčnosti hodnot sklonu a křivosti (Zdroj: výzkum autora)

Po vizuálním přezkoumání celé situace a terénním průzkumu byla tato hodnota určena za akceptovatelnou, jelikož na tomto krátkém úseku skutečně existuje takto velký sklon.

Dalším zajímavým srovnáním bylo porovnání výpočtů sklonu dle navržené metodiky (červená) a implicitního výpočtu SW ArcGIS funkce Add Surface Information (černě), jak ukazuje následující Obr. 39, který zobrazuje reliéf s terénním vrchem (níže uprostřed).



Obr. 39. Porovnání výpočtů sklonu úseků s funkcí Add Surface Information (Zdroj: výzkum autora)

Daleko větší problém nastal při určování křivosti úseků. Vzhledem k tomu, že se jedná o druhé diferenciály nadmořské výšky, metoda vizuální interpretace musela být zpřesněna, protože většina reálných úseků silniční sítě nenabývá predikovatelných hodnot, jak ilustrují i červené hodnoty křivosti výše v Obr. 38. Zároveň je také možné vidět, že některé krátké úseky nabývají nulových hodnot, protože se jedná o linie bez lomových bodů, ačkoliv reálná hodnota vertikální křivosti může být samozřejmě odlišná. To bylo prvním a dalo by se říci i očekávaným problémem. Tento problém by také teoreticky mohl nastat u výpočtu sklonu, pokud by délka jednosegmentové linie byla vyšší, tento problém je však ošetřen ve zmiňované normě ISO GDF 14 825, která doporučuje (nařizuje) netvořit delší segmenty nežli v určité délce na cestní síti v poměru k její podrobnosti a geometrii či v závislosti na samotné délce segmentu a to i v případě jejího neměnného směru (v případě směrových oblouků norma vyžaduje ještě větší segmentaci), i proto byla vybírána datová sada, u níž linie odpovídají těmto a dalším pravidlům při jejich automatizované tvorbě. Většina těchto linií tak obvykle nabývá velmi krátkých

povrchových délek (max. jednotky metrů), u nichž ani není možné očekávat hodnotu výrazně odlišnou od 0 (u křivosti), u sklonu pak je pravděpodobné, že výpočet dosahuje obstojných hodnot (díky potenciálně menší členitosti terénu na kratším území), jak byla dokázáno výše na Obr. 38 s linií s extrémním sklonem, a tak bylo rozhodnuto tyto úseky ignorovat.

První možností pro potvrzení funkčnosti vypočtených hodnot křivosti bylo vytvořit vlastní linie, které by byly ukázkovými vzory konkávních i konvexních typů reliéfů, resp. jejich průběh by kopíroval tyto typické tvary. Tzn., bylo nutné modelovat linie vedoucí napříč údolními (brázdy, kotliny...), resp. vypouklými partiemi reliéfu (hřbety, vrchy, kupy, pahorky apod.), kde by metodika měla podávat jasně orientovaná čísla směrem k více kladným (konkávní) či záporným hodnotám (konvexním). Zároveň byla nastavena velikost prahové hodnoty na vysoko číslo, aby nedošlo k rozdělení zmiňovaných linií a výpočet proběhl pro ně jako celek. Výpočty všech hodnot křivosti jednotlivých morfologických celků ukazuje Příloha 8. Ani v jednom případě nedošlo k výraznému pochybení a všechny tvary dosáhly jim odpovídajícího indexu křivosti. Otázka absolutní velikosti hodnoty už je poté spíše více subjektivní záležitostí, nicméně i tu lze považovat za obstojnou, kde u útvarů více údolnicových, příp. vrcholových dosáhla velikost vyšších hodnot nežli u útvarů, které se blížily spíše nakloněným rovinám, úpatnicím, přehybům či přesmykům (vše ukazuje Příloha 8).

Druhou možností bylo opětovně vybrání linií, kde bylo dosahováno extrémních hodnot křivosti přímo na reálných segmentech silniční sítě. Většina segmentů nabývala hodnot v intervalu mezi $<-2, 2>$, několik linií ještě navíc v intervalech $<-4, 4>$. Existovaly pouze 3 další linie z celkového počtu 300, kde se hodnota dostala i mimo tento interval, jak ukazuje i následující Obr. 40.



Obr. 40. Nepřesně určené linie s extrémní hodnotou křivosti (Zdroj: výzkum autora)

Jedno však měly tyto úseky společné. Vždy se jednalo o linie tvořené pouze jedním lomovým bodem a ten pokaždé ležel poměrně blízko k jednomu z koncových bodů. Po bližším rozboru linií nacházejících se vždy v intervalech křivosti mezi $<-4, -2>$ a mezi $<+2, +4>$ bylo zjištěno, že ze 100 % se jedná o max. dvousegmentové linie. Problém tedy byl především u těchto krátkých linií s jedním lomením, obdobně jako s liniemi bez žádného segmentu, kde algoritmus implicitně nastavil hodnotu křivosti na 0.

Tento problém by tak bylo nutné dodatečně řešit podmínkou, že by měly být prohledávány kritické body pouze u linií, sestávající z více jak dvou segmentů a u prohledávaných linií by byla nastavena podmínka, že algoritmus by byl zastaven v případě, že nově rozdělená linie již obsahuje pouze min. počet bodů, resp. nedovolit algoritmu rozdělit linii vždy v každém prvním nebo druhém lomovém bodu od koncového i počátečního bodu. Jinými slovy by prohledávání linie začínalo vždy až od druhého L_{i+2} (v případě eliminace přímek s nulovou křivostí), v extrémním případě, kdy by bylo nutné zachovávat linie s více jak 2 segmenty, až od třetího

lomového bodu L_{i+3} a končilo vždy u druhého L_{n-2} , resp. třetího lomového bodu L_{n-3} od bodu koncového. To by ovšem mohlo jít proti záměru detekce kritických bodů, jelikož může dojít k situacím, že právě tyto body budou pro modelaci pohybu a především z důvodu optimalizace pro výpočet sklonu těmi nejdůležitějšími. To bylo potvrzeno i v následném testování při změněném počátku a konci vyhledávacího cyklu. Došlo k výrazné redukci detekovaných bodů, kolikrát je třeba i říci, že velmi důležitých pro naši potřebu, tj. kalibrování modelu především z hlediska co nejpřesnějšího výpočtu hodnoty sklonu, nicméně je možné využít tohoto nastavení v případě potřeby získání přesnějších hodnot křivosti.

Bylo proto rozhodnuto ponechat algoritmus v původní neměnné podobě se začátkem prohledávání každé linie v prvním lomovém bodě a konci v posledním lomovém bodě.

Potenciální řešení tohoto problému by mohlo spočívat v zachování minimální délky každého segmentu u těchto jedno či dvousegmentových úseků. Tzn. u krátkých úseků, kde není potenciální hrozba skrytého kritického bodu, by tato linie byla z cyklu vypuštěna, naopak dlouhé linie, kde lze předpokládat vyšší možnou výškovou změnu (vzhledem k max. dosažitelným sklonům na síti PK), by do tohoto cyklu vstupovaly a kritické body by zde byly detekovány na všech mezilehlých bodech. Jednalo by se tak o kompromisní řešení pro zpřesnění výpočtu křivosti u některých prvků a zároveň by nedocházelo ke ztrátě důležitých kritických bodů.

Bohužel problém, který byl uveden výše s výpočtem křivosti u dvousegmentových linií, které mají bod výrazně posunut blíže k jednomu z dvojice koncový-počáteční (příp. jednosegmentových linií) by toto zpřesnění komplexně řešit nedovedlo. Zde by pravděpodobně bylo nutné do výpočtů zapojit i další prvky související s prostorovou lokalizací linie, ovšem ani ty by nemusely pravděpodobně stačit. V těchto případech by se totiž musely využít více než jen lomové body linie. Muselo by se přistoupit k metodám založeným na výpočtu směru (úhlovém) linie v prostoru, resp. jednotlivých segmentů a interpolovat poté jednotlivé hodnoty podkladového rastru nadmořských výšek.

Výpočet pomocí přenesení hodnot rastru křivosti (Curvature) na linii, tedy obdoba výpočtu sklonu u metodiky Louthan (2010) byla zamítnuta z důvodu, že hodnoty křivosti implicitně vypočtené SW GIS odpovídají křivosti pouze ve směrech maximálního sklonu (spádnice) nebo směru vrstevnice či jisté aproximace okolními body. Bohužel jak už bylo řečeno výše, geometrie cestní sítě je od těchto křivek téměř vždy směrově odlišná, nicméně spojení dvou výše uvedených řešení, tzn. výpočtu směru orientace linie vůči souřadnicovému systému (segmentu), horizontální a vertikální křivosti, by mohlo vést k úspěšnému vyřešení tohoto problému.

Pokud by se výpočty vztahovaly k zeměpisným souřadnicím, bylo by možné vypočítat úhel, ve kterém zmíněné křivosti probíhají. Ten by poté bylo nutné porovnat s úhlem vypočteným u orientovaného úseku cestní sítě. U horizontální křivosti by toto neměl být problém, jelikož ta je definována právě na základě polohových souřadnic a průběh vrstevnic je definován spojnicemi rastrových buněk o stejné nadmořské výšce. Hodnota horizontální křivosti se totiž mění na základě hodnot x a y , tím pádem je funkcí polohy. Určení směru vertikální křivosti ve směru spádnice, jak jej umí vypočítat některé SW GIS, by bylo možné počítat pouze v několika základních směrech, které jsou dány rastrovým gridem DMR, resp. prostorovými souřadnicemi (s hodnotami křivosti) středů nejbližších sousedů buňky rastru.

Na základě váženého rozdílu úhlů, tj. k jaké hodnotě by se více blížil směrový úhel daného segmentu, by poté byla výsledná hodnota přiřazována průnikem každého pixelu s daným segmentem. Výslednou hodnotou křivosti úseku by poté byl průměr všech hodnot extrapolovaných na daném úseku z DMR celkové cestní křivosti. Tento postup však z důvodu značné složitosti, rozsahu a pravděpodobně vysoké náročnosti na výpočetní stroj nebylo možné realizovat, a může tak sloužit jako návod na další postup při zlepšování a zpřesňování výpočtu křivosti libovolných liniových prvků.

5.3.1 Porovnání s předchozími metodikami

Testování přesností různých metodik výpočtu morfometrických charakteristik probíhalo nad nejpřesnějším dostupnostním modelem. Tím byl zvolen exponenciální s parametrem $h = 5\text{m}$, viz Příloha 6 a Příloha 7.

Při zvolené výšce $h = 50\text{ m}$ a 25 m došlo na modelované cestní síti pouze na rozdělení jedné, resp. několika málo linií a výsledky by proto byly poměrně shodné s metodikou ČSN 73 61 01, a tak největší prahová hodnota, na které začínalo testování celého řešení exp. trendu, byla hodnota 10 m .

Implementace řešení podle Hudečka (2008)

Implementovat řešení podle Hudečka znamenalo vypočítat sklony pro každou linii na základě výše uvedeného vzorce. Zároveň také byly jednotlivé délky úseků počítány pomocí polohové vzdálenosti 2 bodů. Výsledné hodnoty jsou poplatné využití této metodiky, která byla především určena pro makroekonomické (dopravní) modely a dopravu motorizovanou. Absolutní hodnota sklonu nemůže postihnout přesně jednotlivé výškové profily tras, nicméně z metodik, které nedokážou postihnout orientaci jízdy, je tou nejpřesnější, jak i dokazují uvedená čísla, které uvádí Příloha 7.

Implementace řešení podle ČSN 73 61 01

Jedná se v podstatě o výše uvedenou metodiku jen s tím rozdílem, že metodika ČSN díky absenci absolutní hodnoty dokáže postihnout a odlišit stoupání a klesání a navíc uvažuje i reálnou délku úseků po povrchu. Počítá však s nejjednodušší aproximací křivek pomocí spojnice koncového a počátečního bodu, na základě níž počítá výsledný sklon. Ten však většinou nebývá o mnoho odlišný nežli sklon maximálně aproximovaný (vážený podle jednotlivých segmentů). Toto vše bylo zohledněno při výpočtech a implementováno do modelu. Výsledky, které uvádí Příloha 7, proto nejsou vůbec špatné a do jisté míry lze tento model již označit za reálně využitelný pro účely cyklo dopravy.

Implementace podle povrchových funkcí GIS

Jak již bylo naznačeno výše, SW GIS dokáže vypočítat sklony pro liniový prvek. Pro implementaci řešení tak bylo využito předpřipravené funkce Add Surface information, kde byla přiřazena jednotlivým liniím průměrná hodnota sklonu. Ta je implicitně vypočtena ve stupních, následoval poté ještě převod na %. Tato funkce však opětovně naráží na to, že neumí počítat se zápornými hodnotami sklonu, nedokáže tak odlišit směry jízdy a navíc ani podle vizuální interpretace nenabývá reálných hodnot z terénu, jak dokazuje i srovnání výše (Obr. 39). Velká část hodnot sklonů totiž v dané oblasti nabývá dvouciferných hodnot a to včetně silnic, které by v takovýchto sklonových poměrech a na takovýchto vzdálenostech neměly být vůbec projektovány ani v horských oblastech, kterou Posázaví do zajista není, a tak tento postup nepovažují jako vhodný k využití modelování cyklistické dopravy, jak také dokazuje níže

uvedená Příloha 7, která porovnává tyto hodnoty s hodnotami mj. vypočtenými dle metodiky váženého průměru.

Implementace řešení podle Louthana (2010)

Jako první bylo nutné přiřadit jednotlivým segmentům sítě průměrný sklon dle metodiky Louthana (2010). V SW ArcGIS lze tento výpočet provést za pomoci nástroje Zonal Statistics as Table, který obsahuje extenze Spatial Analyst. Nástroj vytváří v nové atributové tabulce statistiky (střední hodnota, průměr, maximum atd.) hodnot pixelů rastru na zájmových územích. Zájmová území jsou definována plochami jiného rastru, polygony nebo liniemi – v našem případě jednotlivými PK.

Do samotného nástroje byla načtena vstupní vrstva komunikací, která definuje úseky, pro něž jsou hodnoty z rastru počítány (jsou odlišeny na základě jednoznačného identifikátoru úseku PK atributu „FID“) a grid sklonů, který byl pro tyto potřeby vytvořen za pomoci prostorových analýz SW GIS. Hodnota buňky rastru byla zvolena ve stejné velikosti jako hodnota velikosti buňky u nadmořských výšek, tedy 2 m. K výsledným hodnotám FID byla přiřazena průměrná hodnota sklonu (převedená na %) všech pixelů, kterým prochází každý z liniových prvků. Následně vytvořená tabulka byla poté napojena na vlastní komunikační síť, na níž mohl proběhnout výpočet průměrné rychlosti pro každou linii podle převodního vzorce.

Tato metodika, jak již bylo řečeno v rešeršní části, s sebou přináší některá úskalí, jak se nyní potvrdilo v této analýze. Prvním je, že SW GIS implicitně počítá hodnoty sklonu nikoliv ve směru komunikační sítě, ale ve směru spádnice. Hodnoty sklonů tak povětšinou zdaleka neodpovídají reálným hodnotám na síti PK (téměř vždy jsou vyšší). Navíc díky tomu, že tato metodika nedokáže odlišit směr sklonu (po/proti směru linie) bylo dosahováno vysokých hodnot pouze v oboru R^+ . To však pro implementaci do převodní rovnice znamenalo získání velmi nízkých čísel průměrné rychlosti a tím naopak vyšších hodnot času, jak i potvrzuje Příloha 7. Tento model tedy není vhodný pro využití v cyklo dopravě a je, jak již bylo popsáno, využitelný hlavně v dopravě automobilové, kde směr pohybu jízdy není až tak důležitým faktorem.

5.4 Hodnocení v síťových analýzách

Zároveň byl také nový algoritmus testován v SW GIS pomocí základních síťových analýz. Jednalo se především o výpočet dojezdových vzdáleností mezi různými destinacemi s různými převýšeními, vzdálenostmi, s různými povrchy cest a v obou směrech odděleně. Na území se zároveň nachází velké množství značených tras, které jsou v plánovačích tras téměř vždy routovatelné. Příloha 5 zachycuje členitost území pomocí gridu sklonů, vypočteného v prostředí GIS, a znázorňuje jednotlivé modelové trasy na zkoumaném území.

Trasy byly vybírány:

- s ohledem na jejich délku a nezapočítání faktoru únavy – tj. musela být volena v kratších vzdálenostech. Hraniční délka byla zvolena na 5 km kvůli přesnosti dané metodiky,
- na základě využitelnosti a srovnání výsledků s plánovači tras, jelikož u většiny z nich nejsou všechny cesty routovatelné,
- také na základě terénu tak, aby kombinovaly různé druhy výškových profilů a podloží (typu povrchu),
- zahrnovaly i úseky s extrémními hodnotami křivostí a sklonitostí.

5.4.1 Hledání cesty a výpočet časové vzdálenosti

Pro vlastní síťové analýzy bylo potřeba vytvořit optimální síťový model, který je nejčastěji vytvářen nad třídami prvků v geodatabázi. Podle ArcGIS Desktop Help (ESRI, 2012) umožňuje systém vytvoření dvou základních modelů: Geometric Network (geometrická síť) a Network Dataset (síťový dataset).

Síťový dataset se hodí pro aplikaci dopravních úloh, protože je zde umožněn pohyb po jednotlivých liniích v obou směrech, pokud není určeno jinak. V případě síťového datasetu může být model tvořen i nad daty shp, ale narozdíl od možnosti geodatabáze do něj nelze zahrnout více vstupních prvkových tříd (tj. zdrojů hran a uzlů) a analyzovat tak např. multimodální síť. Struktura síťového datasetu se také liší od geometrické sítě obsazením prvku odbočení (turns), které umožňují definovat přechod mezi jednotlivými hranami a také tvorbou a kontrolou propojení sítě. Zde jsou nejdříve vybrány vstupní třídy prvků a potřebné atributy a na jejich základě je pak již vytvořena výsledná síť s patřičnými prvky a hodnotami dle uvedených atributů. Z hlediska síťového datasetu je možné u jednotlivých prvků definovat následující atributy:

- *cena (cost)* - vyjadřuje náklady (impedanci) na překonání prvku nejčastěji v podobě délky nebo času,
- *popis (descriptor)* - lépe charakterizuje specifické vlastnosti sítě např. rychlostní limity, počty pruhů silniční sítě atd.,
- *omezení (restriction)* - umožňuje zakázat využití určitých prvků sítě v jednotlivých analýzách, jestliže je splněna podmínka příkazu - příkladem nasazení může být omezení průjezdu jednosměrnou komunikací v opačném směru, zahrnutí jen zpevněných povrchů atd.,
- *hierarchie (hierarchy)* - představuje preferenci prvků například z hlediska třídy komunikace od hlavní po lokální.

Vzhledem k dopravnímu zaměření diplomové práce byla pro další postup zvolena struktura síťového datasetu, který bude díky vhodným ohodnocením a nastaveným atributům dokáže dobře modelovat síť nejen cyklistických komunikací. Všechny založené atributy mohou být zahrnuty při síťových analýzách. Podrobné nastavení hodnot jednotlivých atributů se provádí pomocí přidělení hodnot v závislosti na orientaci hrany. V případě zmiňované orientace znamená *From-To* (FT) ve směru digitalizace linie a *To-From* (TF) ve směru opačném. Zároveň bylo také možné pomocí restrikcí zakázat průchod určitými liniemi.

V návaznosti na terénním průzkumu a na modelových trasách bylo nutné tuto cestní a časovou vzdálenost určit nad vytvořeným síťovým datasetem za pomoci vybraných dostupnostních modelů a metodik určení morfometrických charakteristik terénu. Výsledné časy a hodnocení jednotlivých dostupnostních modelů ukazuje Příloha 6. Hodnocení potenciálně vhodných metodik pro výpočet sklonu pak s využitím toho exponenciálního modelu hodnotí Příloha 7, jak již bylo naznačeno výše. Výsledným časům poté byly přidělovány body na základě jejich přesnosti, kdy nejpřesnější model získal pro daný úsek 2 body (červeně zvýrazněný), druhý nejpřesnější bod 1 (zvýrazněný).

Hodnocení je možné také provést na základě několika více exaktně vyjádřených parametrech:

- relativní výškové členitosti trasy (prům. absolutní sklon na trase): $R_t = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta h_i|}{L_1} [\%]$, kde L_1 je celková povrchová délka trasy a Δh je výšková změna jednotlivých úseků,

- směru orientace jízdy vs. směru orientace sklonů (počet nastoupaných metrů vs. počet výškových metrů zklesaných) – průměrná hodnota sklonu trasy,
- indexu zpevněnosti trasy: $I_z = \sum_{i=1}^n \frac{l_i \cdot P_{li}}{L_1} [-]$, kde L_1 je celková povrchová délka trasy, l_i je délka jednotlivých úseků a P_{li} je hodnota typu povrchu²³ definována dle normy ISO GDF 14 825,
- délky trasy.

Všechny tyto vypočtené parametry zobrazují Příloha 9 až Příloha 13 pro trasy 1 až 5.

Při pohledu na výsledky jednotlivých modelů dostupnosti (Příloha 6) je patrné, že model využívající více proměnných – tedy lineární s křivostí nedokázal postihnout přesně pohyb po síti. Jeho výsledky je do jisté míry možné ztotožnit s výsledky, které podávaly modely lineární jednoduchý (bez využití křivosti) a model kvadratický. U tras s vyšším indexem zpevněnosti a vyššími hodnotami průměrného sklonu došlo vypočtení nižších časových hodnot nežli byla realita. Naopak u tras s nižším indexem zpevněnosti a nižšími hodnotami průměrného sklonu byl výsledek opačný, tj. dojezdové doby byly povětšinou delší. Nutno podotknout, že nižší hodnoty průměrného sklonu trasy neznamenají nízkou relativní výškovou členitost. Znamenají pouze větší orientaci na jeden z indexů sklonu, tzn. trasa je více směřována z kopce či do kopce. Samotná relativní výšková členitost je uvedena v podobě celkového převýšení a procentuálnímu vyjádření vůči její délce. Zároveň u nejvíce orientované trasy ve směru jednoho indexu (trasa 1) sklonitosti došlo k určitému „zhlazení“ časových hodnot a to nevyjmačně u všech dostupnostních modelů. To je dáno extrémností této trasy s ohledem na průměrný sklon, který dosahoval až 6 %. Kromě tří výše uvedených modelů došlo k tomuto zahlazení i v případě trasy č. 2, která je taktéž velmi „jednostranně kopcovitá“ – průměr – 3,5 % v jednom směru. Naopak u tras s relativně menším průměrným sklonem, docházelo k podcenění časových hodnot u nově vytvořených modelů (kromě exponenciálního).

Jediný z nově vytvořených modelů, který se podobal těm z dřívějších prací, byl právě model exponenciální, ačkoliv modely Kosarové (2003) a Tázlara (2012) jsou kvadratické. Při srovnání právě s těmito staršími modely dostupnosti u Kosarové (2003) docházelo povětšinou k podcenění časové náročnosti kromě trasy č. 5, tedy trasy s nejmenší relativní výškovou členitostí (kolem 3,5 %). Potvrdil se tak předpoklad, že tento model by měl být vhodnější pro členitější území extravilánu, kde byl také vytvářen. Zajímavé také je, že ačkoliv se v žádném ze zmiňovaných časů nedokázal dostat na první dvě místa, průměrná časová chyba (viz níže) byla druhá nejlepší ze všech hodnocených modelů dostupnosti. Potvrdilo se také, že model Tázlara (2012) je vhodný spíše pro městské oblasti, jelikož podával spíš nadhodnocené časy, tzn., předpokládal nižší průměrné rychlosti.

Pro komplexnější hodnocení je však nejdůležitější údaj průměrné časové chyby modelu t_{Res} , která byla vypočtena pomocí vzorce:

$$t_{Res} = \frac{\sum |T_{pred} - T_{real}|}{T_{tot}} [0\%],$$

kde T_{pred} jsou hodnoty predikované jednotlivými modely, T_{real} je celková reálná jízdní doba trasy a T_{tot} je celková jízdní doba všech tras.

²³ Typ povrchu úseků je definován danými diskrétními hodnotami P_l . $P_l = 1$ – zpevněný - asfalt, beton, dlažba; 2 – nezpevněný - štěrk, štěrkopisec; 3 – poškozený zpevněný; 4 – ostatní nezpevněné – polní a lesní cesty (Zdroj: ISO GDF 14 825)

V tomto ohledu jasně nejpřesnějších výsledků dosahoval exponenciální model, následovaný zmiňovanou Kosarovou (2003) a na třetím místě se umístil model jednoduchý lineární. Díky úspěšnosti prvně zmiňovaného modelu a začleněním záporných hodnot sklonu je tak možné říci, že rychlost stoupá exponenciálně se snižující se hodnotou sklonitosti. Tento nárůst je navíc větší u zpevněných nežli nezpevněných komunikací, jak dokazuje matice rychlostí - Příloha 14. Zároveň ale u extrémních hodnot kladného sklonu konverguje u zpevněných komunikací rychleji k 0, což by mohlo být považováno za největší slabinu tohoto modelu, jelikož by tomu teoreticky mělo být obráceně, nicméně k této změně dochází až u takových hodnot sklonu, které obvykle nejsou na cestní síti reálně dosahovány, nebo se příp. jedná o velmi krátké úseky, proto bylo rozhodnuto tento model více nekomplikovat dalšími úpravami, které by ho jen zbytečně zesložitovaly pro automatizované využití a jeho potenciál by se tak výrazně snižoval. Co však bylo nutné, bylo jeho omezení shora na 60 km/h u zpevněných komunikací, omezení na 40 km/h se ukázalo jako nepotřebné z důvodu toho, že vyšších hodnot by bylo reálně dosáhnout až při sklonech vyšších 20 %, které se na cestní síti vyskytují jen velmi zřídka. Další otázkou také je, jaká je reálnost využití těchto hodnot u terénu vhodného pouze pro MTB (horská kola – tj. spíše stezky pro pěší), kde při nízkých hodnotách sklonů jsou takovéto rychlosti nereálné. To však nebylo cílem ani účelem této práce. Je dost pravděpodobné, že u tohoto typu terénu by převodní rovnice vypadala úplně jinak.

V další části pak byl exponenciální model porovnáván v síťových analýzách s dojezdovými hodnotami vytvořenými na základě metodik výpočtu sklonitosti uvedených v kapitole 5.3.1 Zde se potvrdila nevhodnost postupu zvoleného Louthanem (2010), který udával příliš nízké hodnoty průměrné rychlosti díky tomu, že byly naopak počítány na základě vysokých hodnot na gridu sklonu, který je počítá implicitně po spádnicí, tj. v jeho maximech a také díky tomu, že nedokáže rozeznat index sklonitosti, tzn., že považuje všechny úseky za jízdu do kopce. Čestnou výjimkou byla trasa 5, která měla výrazně nižší hodnoty relativní výškové členitosti. Tato metodika tak není příliš vhodná pro využití u oblastí s vyšší členitostí.

Obdobných, i když povětšinou ne tak extrémních časových hodnot, jako Louthan (2010) dosahovala funkce potenciálně využitelná pro účely této práce ze SW ArcGIS (Add Surface Information), a to především ze stejných důvodů jako u Louthana. Z jednotlivých metodik výpočtu sklonu, které nedokáží rozeznat směr jeho orientace tak nejpřesnějších výsledků dosáhla metodika Hudečka (2009). Velmi přesných výsledků také dosahuje výpočet času s využitím normy ČSN 73 61 01, která již odlišuje sklon kladný a záporný. Její průměrná časová chyba již v přesnosti převyšuje hodnoty dosažené u modelu Kosarová (2003). Celkově je třeba říci, že podávala velmi zahlazené výsledky směřující k vyrovnaným jízdám v obou směrech. To je dáno především tím, že jednotlivé úseky nebyly rozděleny žádnými kritickými body a některé globální/lokální segmenty tak byly z výsledných výpočtů chybně eliminovány. Přesnějších výsledků poté bylo docíleno při využití parametru h , s jejímž postupným snižováním až po určitou hranici bylo dosahováno u většiny případů větších diferenciálů mezi hodnotami jízdy v obou směrech, čímž se model začal více přibližovat reálně naměřeným hodnotám.

Celkově je tak možné říci, že nejpřesnějších hodnot dosahovaly všechny modely vytvořené v této práci, které se odlišovaly velikostí testovaného parametru prahové hodnoty h . Nutno také ještě podotknout, že zároveň byly také testovány ještě některé další kombinace výpočtových metodik sklonu s dalšími převodními rovnicemi určenými v této práci, nicméně exponenciální model se ukázal i v kombinaci s dalšími metodami jako nejpřesnější.

5.5 Srovnání s mapovými portály a plánovači tras

Poslední částí testování bylo srovnání těchto modelů a metodik s dostupnými webovými mapovými portály a plánovači tras. U většiny dostupných webových mapových portálů bylo však naráženo na problém neexistence módu cyklodopravy. Příkladem takových portálů jsou například Google Mapy, Nokia mapy, TomTom Route Planner, ViaMichelin, Bing Maps, Plánovač tras Škoda Auto, Mapy Centrum atd.

Existují pak také webové mapové portály zabývající se cyklodopravou, avšak bez možnosti routování, plánování tras nebo výpočtu dojezdové vzdálenosti. Příkladem je webový portál Cykloserver.cz na podkladových mapách společnosti Shocart. Zde je nemožnost routingu dána tím, že mapy jsou na webovém portálu uloženy pouze formou rastrových dlaždic, chybí však podkladová vektorová vrstva vhodná pro síťové analýzy.

Jedinými celorepublikovými servery, které mají zohledněn mód cyklodopravy, jsou tak Mapy.cz (Seznam) a mapy.idnes.cz (MAFRA), jež do jisté míry využívají stejných dat. Zároveň i zde byl problém, že nejsou kompletně routovatelné, jak dokazuje Příloha 6, kde tak většina účelových komunikací, stezek a pěšin neumožňuje výpočet časové vzdálenosti. Výjimku tvoří pouze cesty s vyznačenou cyklistickou trasou či stezkou²⁴, příp. se značenými turistickými trasami. Vybrané trasy v terénním průzkumu se tak snažily alespoň částečně využívat těchto tras, aby mohlo dojít k alespoň rámcovému porovnání.

Při něm se následně ukázalo, že tyto mapové portály nezohledňují do výpočtu výsledného času žádný morfometrický parametr. Výsledné časy u jednotlivých tras byly proto shodné v obou směrech a nutno podotknout, že tím i velmi nepřesné, jak opět dokazuje Příloha 6. Průměrná časová chyba dosáhla v této oblasti více než 30 %, což už je poměrně velmi vysoké číslo. Dalo by se tak říci, že tyto dostupnostní modely nevyhovují potřebám cyklonavigačních účelů.

²⁴ O terminologii v cyklistické dopravě více uvádí Boháč (2006).

5.6 Shrnutí výsledků

Veškeré výsledky všech využitých modelů a metodik ukazují Příloha 6 a Příloha 7. Celkové pořadí desíti nejlépe hodnocených modelů a metodik v kombinaci seřazených podle nejdůležitějšího hodnotícího faktoru, tedy velikosti průměrné časové chyby shrnuje následující tabulka:

Pořadí	Model dostupnosti	Metodika výpočtu sklonu	Parametr h [m]	Prům. časová chyba [%]
1.	Exponenciální	Vážený průměr (b)	5	6,93
2.	Exponenciální	Vážený průměr (b)	2,5	7,31
3.	Exponenciální	Vážený průměr (b)	10	8,36
4.	Exponenciální	ČSN 71 63 01	-	10,37
5.	Kosarová (2002)	Vážený průměr (b)	5	12,27
6.	Lineární jednoduchý	Vážený průměr (b)	5	17,18
7.	Lineární složitý	Vážený průměr (b) včetně křivosti	5	18,01
8.	Kvadratický	Vážený průměr (b)	5	19,01
9.	Exponenciální	Tázar (2012)	-	25,36
10.	Hudeček (2009)	Absolutní hodnota úseku	-	28,55

Tab. 16. Výsledné hodnoty přesnosti 10 nejlepších modelů dostupnosti v kombinaci s metodami určení morf. parametrů za využití síťových analýz (Zdroj: výzkum autora)

Jak je z Tab. 16 patrné, metodika váženého průměru délky jednotlivých segmentů po povrchu obstála při srovnání s ostatními modely dostupnosti a metodami určování morfometrických parametrů terénu při řešení v síťových analýzách. Je však třeba říci, že každý z využívaných modelů byl testován na jiném území, za jiným účelem, na jiném měřítku, v jiném módu dopravu apod. Tato práce měla však také zjistit jejich funkčnost při využití nejlepších možných dat na trhu včetně porovnání s nabízenými řešeními pomocí webových mapových portálů. Celkové chyby, kterých bylo dosaženo, byly zároveň způsobeny kromě nedostatků ve zvolených metodikách a modelech také dalšími faktory jako jsou drobné chyby ve vstupních datech a jejich zpracování a pak také v samotném terénním průzkumu, chybě přístrojů GPS, chybné lokalizaci trackpointů na silniční síť a zároveň také v chybě samotného měření reálné časové vzdálenosti jednotlivých tras, kde by bylo potřeba zohlednit do výsledné časové doby ještě další zpřesňující faktory nebo měření opakovat více než 2x v jednom směru. Celkově by zpřesnění modelu vyžadovalo daleko rozsáhlejší terénní průzkum, ten ale nebyl v rámci možností práce realizovatelný.

I přes výše uvedené nedostatky a zdroje potenciálních nepřesností, lze považovat více než 93% úspěšnost nejlepší kombinace modelu a metodiky časového určení jízdních dob za dobrý výsledek, se kterým lze dále pracovat a který lze postupně vylepšovat jak v oblasti zpřesňování metodiky určování morfometrických charakteristik terénu tak také u samotných dostupnostních modelů. Výsledné převodní rovnice exponenciálního modelu a nejhodnější hodnotu parametru h pro zkoumanou oblast podává následující nejdůležitější výsledek této diplomové práce.

$$y_{zpev} = 19,03 \cdot (-9,45)^{x_1}$$

$$y_{nezp} = 14,08 \cdot (-5,33)^{x_1}$$

$$\Delta h_p = 5 \text{ m,}$$

kde y jsou výsledné průměrné rychlosti, x_1 je sklon a Δh_p je hodnota prahové vzdálenosti.

6 DISKUZE A ZÁVĚR

Během řešení práce se objevovalo mnoho problémů, které bylo potřeba řešit. Většina z nich již byla zmíněna v průběhu psaní metodiky a některé byly objasněny v následném testování a hodnocení výsledků s využitím jak síťových, tak i prostorových analýz. Následující podkapitoly by měly shrnout to, co se podařilo splnit a co se naopak nepodařilo. Co se očekávalo a bylo splněno a naopak co se ukázalo jako neočekávané a mělo vliv na další řešení práce.

6.1 Diskuze

Pro diskuzi bylo nejprve nutné najít odpovědi na začátku položené výzkumné otázky. První z nich se zabývala tím, jestli je vůbec možné a příp. jak zautomatizovat proces zohlednění podélného sklonu a křivosti v síťových analýzách. Odpověď na tuto otázku přinesla navržená metodika, která pro účely síťových analýz dokázala připravit oba zmiňované parametry automatizovaným způsobem, což přineslo daleko rychlejší řešení a aplikaci daných postupů. Metodika obšírně popisuje a dokumentuje tento vztah pomocí navržených matematických a kartografických postupů, které přináší jasně definované hodnoty vztahu mezi DMR a komunikacemi. Tento proces byl následně verifikován na základě hodnocení nejen v síťových analýzách.

Druhá otázka se zabývala problémem, jak tento vztah mezi DMR a síťovými analýzami pospat a jaké jsou podmínky pro využití daných postupů v prostředí GIS. Tento vztah byl na základě vypočtených hodnot morfometrických charakteristik jasně definován pomocí převodních rovnic, které byly následně využity jako modely dostupnosti v síťových analýzách GIS. K jeho přesnějšímu určení byly také využity některé prostředky kartografických generalizačních algoritmů a geomorfologických vzorců pro určování křivosti reliéfu. I za pomoci těchto metod byl vztah dostatečně přesně a obecně popsán pro účely práce a pro všestranné využití napříč všemi platformami GIS. Tzn., že daná metodika by měla být aplikovatelná téměř všemi programy, které jsou schopny pracovat s liniovými vektorovými a rastrovými daty v prostoru a neměla by tak stavit žádné omezující podmínky pro její využití v omezeném množství softwaru.

Zároveň také byly implementovány metodiky z dalších studií zmiňovaných v této práci, jejichž výsledky byly porovnány s navrženou metodikou. Jako nejpřesnější však nakonec byla zvolena za pomoci síťových analýz vlastní, která byla postavena na základě matematického vyjádření průběhu linie, definované lomovými body a jejich orientací v prostoru.

Dalším problémem byl způsob zohlednění podélného sklonu a křivosti v době nutné k překonání komunikace. Tato vazba, jak již bylo řečeno výše, byla nastavena pomocí převodních vzorců s definovanými nezávisle proměnnými parametry – sklonu a křivosti v multiregresní analýze. Nicméně pro exaktní vyjádření časových hodnot bylo potřeba mít k dispozici nejen hodnoty morfometrické, ale také hodnoty využitelné v síťových analýzách – převodní závislou veličinu rychlost. Ta byla vytvořena metodikou sběru trackpointů z pozemní kampaně GPS, která umožnila provázání těchto hodnot vhodných pro síťové analýzy s hodnotami morfometrickými.

Využitelnost tohoto vztahu se však potvrdila jen částečně díky velmi nízkému koeficientu determinace a pak také díky malé vypovídací hodnotě proměnné křivost, resp. tato proměnná nedokázala výsledným převodním rovnicím zvýšit jejich vysvětlovací schopnost pro síťové analýzy, a tak vztah tohoto morfometrického parametru druhého řádu nelze v této práci považovat za objasněný, a nelze proto křivost zařadit do možného řešení síťových analýz v prostředí GIS. I přesto však byla proměnná v těchto analýzách testována, nicméně dosažené výsledky nevhodnost tohoto zařazení následně potvrdily. Výsledné matematické vztahy tak lze považovat jako platné pouze pro proměnnou sklon a tento výzkumný cíl označit za stále otevřený pro další budoucí řešení této problematiky.

Další otázkou bylo, jakým způsobem zohlednit pohyb na grafu, resp. na cestní síti u DMR. Tento vztah byl určen na základě geometrie každé linie a jejich incidence. Díky orientaci každé linie v prostoru tento vztah bylo možné automatizovaně řešit pomocí navržené metodiky, která jasně definuje, kterou hodnotu přiřadí pro jaký směr pohybu na síti do výsledné databáze. Tuto výzkumnou otázku se tak podařilo vyřešit beze zbytku.

Pátá výzkumná otázka řešila problematiku zohlednění dalších parametrů do výsledného vztahu DMR a síťových analýz. Tato možnost vycházela především z možností jednotlivých vstupních dat, tzn., bylo nutné vybrat ty nejvhodnější datové sady pro účely této práce. To bylo provedeno na základě stanovení jasně definovaných min. požadovaných kritérií, které by měly zaručovat nejen co nejpřesnější výsledky, ale také možnost zakomponování maximálního množství dalších parametrů. Ty však bylo na základě výzkumu vůbec nutné definovat. Již z předešlých prací bylo zřejmé, že nejdůležitějším dalším parametrem terénu, mající největší vliv pro řešení v síťových analýzách, je jeho samotný povrch. Díky možnostem vstupních dat bylo tento parametr možné zohlednit do řešení v síťových analýzách v prostředí GIS. Ostatní parametry terénu jako např. orientace nebyly shledány jako významné z hlediska vhodnosti využití. U ostatních parametrů, především u cestní sítě, nebylo primární náplní práce jejich začleňování do síťových modelů, nicméně jejich absence se poté ukázala jako klíčová pro nemožnost začlenění křivosti. Bohužel však tyto parametry by bylo velmi obtížné získávat a především implementovat do daného řešení, proto tato výzkumná otázka byla splněna pouze částečně a zůstává tak do budoucna stále nevyřešena.

Předposlední výzkumná otázka byla vyřešena za pomoci SW nástrojů GIS, které jsou schopny toto řešení zajistit beze změny parametrů vyhledávacího algoritmu. Ten tak nebylo nutné pro účely této práce nějakým způsobem modifikovat či vytvářet dokonce algoritmus vlastní, který by funkčnost metodiky dokázal zajistit. Tato otázka byla vyřešena v již samotné rešeršní části práce.

Pro ověření celého postupu bylo nutné tento proces celý zautomatizovat za pomoci vybraného programovacího jazyku jako nástroj využitelný v prostředí GIS – tzv. toolboxu. Problematická místa byla popsána již v metodické části. Jeho implementace byla řešena za pomoci programovacího jazyka široce používaného v prostředí GIS tak, aby si téměř každý, včetně těch, co tento programovací jazyk neovládají, mohl ověřit jeho funkčnost, resp. funkčnost celé metodiky. Aby byl tento nástroj využitelný pro jakékoliv typy vstupních dat silniční sítě, nebyla automatizována poslední část týkající se samotného převodu morfometrických parametrů na rychlost díky tomu, že ne každá datová sada může disponovat parametrem typu povrchu komunikací. Tato část nicméně automatizovaně ověřena byla, jen není součástí přiloženého toolboxu. Poslední výzkumná otázka tak byla realizována beze zbytku.

Práce tak z velké většiny naplnila stanovené výzkumné otázky a obecně je možné říci, že navržená metodika splnila očekávání do ní vkládaného alespoň autorem samotným. Vypočtené hodnoty sklonu odpovídají rámcově hodnotám vyskytujícím se v terénu, stejně jako hodnoty křivosti u většiny liniových prvků, které jsou tvořeny více lomovými body. Zároveň i vyřešení otázky směru jízdy se povedlo naplnit za pomoci určení geometrie liniových objektů.

V průběhu práce se však objevilo několik dalších problémů, které bylo potřeba řešit. Některé byly vyřešeny již v samotně navržené metodice, jiné v testování za využití různých parametrů a nastavení algoritmu, využitím odlišných způsobů detekce kritických bodů či jiných variant pro výpočet křivosti, jiné bohužel zůstaly nezodpovězeny, resp. nebyly vyřešeny úplně nejpřesněji.

Jedním z problémů, který podle mého názoru, mohl způsobit určité nepřesnosti v navržené metodice, bylo výše uvedené segmentování silniční sítě. To do jisté míry může způsobit problém s krátkými úseky s menším počtem segmentů, ale zároveň také může způsobit v oblasti planárních uzlů (křižovatek) problém při „snapování“ bodů z terénního průzkumu a jeho přesnosti. Zde bohužel tato metodika naráží na problém přesnosti GPS a jejího polohové určení, které u turistických přístrojů není samozřejmě takové jako u geodetických GPS, nicméně pro rozsáhlý terénní průzkum navíc někdy ve vysokých rychlostech nebylo těchto drahých přístrojů raději využíváno. Tyto typy GPS se využívají výhradně pro statická měření v terénu pro bodové vrstvy, nikoliv pro sekvenční záznam bodů a jejich rychlosti. V tomto ohledu by tak bylo nutné mít k dispozici větší počet měřících zařízení a jednotlivé body zaznamenávané ve stejném intervalu následně upravovat podle polohové přesnosti a převádět na jednu výslednou linii, která by tvořila jejich geometrický průměr („střední linie“), založený na měření jejich vzdáleností a incidenci, jak ukazuje např. Homola (2008). I tento postup by však narážel na určité problémy především u míst, kde byla dosahována nižší rychlost, jelikož zde je přesnost záznamu trasy snížena díky tomu, že přístroje nedodávají v klidové poloze stále stejné údaje. To ale opětovně naráželo na problematiku možností autora a v samotném typu terénního průzkumu. Ani tak by však nebylo možné se v určité vzdálenosti od planárního uzlu této chybě vyhnout.

Zároveň také určitá nepřesnost mohla vznikat při měření rychlosti díky samotnému nastavení intervalu záznamu na hodnotu 10 m, a to především u ostrých zatáček, kde se přímá spojnice bodů liší od reálné trajektorie komunikace. V těchto místech však polohová přesnost dosahovala nižších hodnot, a tak byly povětšinou tyto body eliminovány na základě jejich nelokalizování na cestní síť.

Dalším problémem v oblasti měření bylo využití dalších typů komunikací, především stezek pro pěší, které jsou využívány většinou horskými koly a kde by do převodní rovnice vstupovalo daleko větší množství faktorů terénu. Zde by pravděpodobně bylo nutné využít ještě přesnějších dat DMR-5G, který lépe dokáže postihnout tyto lokální nerovnosti a překážky působící na cyklistu. Zároveň by již pravděpodobně bylo nutné využít i jiný typ interpolační metody, zaměřený více a pouze na nejbližší okolí buněk, bodového mračka nežli více zhlazeného využitého u samotné silniční sítě. Rovněž by také mohla být zajímavá změna dopravního prostředku (např. silniční kolo,...), která by umožnila i porovnání výsledků. Nakonec také nesmíme zapomínat ani na další okolní vlivy (počasí a denní doba) a parametry samotného uživatele (únava, zdatnost apod.).

Tímto směrem by se v budoucnu mohl zabývat výzkum na straně dopravních modelů – tj. využití pro pěší, využití odlišných dopravních prostředků, využití dalšího typu cest - stezky MTB, tzn. nutnost začlenění dalších proměnných jak na straně uživatele, tak na straně reliéfu v podobě zapojení jeho doteď neuvažovaných nebo obtížně implementovatelných parametrů.

Tato záležitost do jisté míry souvisí s implementací jednoho z nich - křivosti a začleněním dalších faktorů daných zákony setrvačnosti a síly. Kromě časového hlediska (času strávenému na určitém úseku) by bylo potřeba vyřešit ještě incidenci jednotlivých úseků ve směru pohybu. Výslednou velikost pohybového vektoru by tak bylo nutno počítat hierarchicky na základě sousednosti rozsáhlejších tras složených z úseků PK. Zde opět připadá v úvahu rozdělení dle signifikantních kritických bodů, které však naráží na další problémy způsobené incidencí jednotlivých úseků, které jsou rozděleny min. v jednotlivých planárních uzlech (křižovatkách). To způsobuje i možnost měnit v těchto uzlech směr pohybu a tím i posloupnost jednotlivých úseků, která poté může mít výrazný vliv na velikost pohybového vektoru. Bylo by proto nutné pro každý z těchto uzlů počítat, jakým způsobem se změní velikost pohybového vektoru, pokud dojde k pohybu v každém z povolených směrů, tj. pro každý manévr zvlášť a následně např. přiřadit určité váhy či koeficienty ke každému z nich. Zároveň by také s tímto souvisela i nutnost vyvinout či modifikovat vyhledávací (routovací) algoritmus, který by na základě vybrané trasy dokázal v každém z uzlů přiřadit správnou hodnotu (dle manévru) a zohlednit jej do výpočtu výsledné velikosti pohybového vektoru (rychlosti). Další věcí také je, že na velké části z těchto uzlů již určitá omezení existovat mohou (světelná signalizační zařízení, značky dávající přednost v jízdě jednomu směru apod.) především v městském prostředí. I ty by bylo dobré pro zpřesnění tohoto modelu do výpočtových schémat zahrnout stejně jako další faktory.

Dalším problémem, který bylo v této práci potřeba řešit, bylo samotné stanovování převodních rovnic, které měly zajistit exaktní transformaci morfometrických parametrů na výsledný pohybový vektor. Zde bylo možné volit několik alternativ, včetně těch teoreticky nejvíce přesných, tzn. polynomů vyšších řádů, které by měly nejlépe aproximovat bodovou vrstvu. Je to však za cenu jejich větší složitosti. U nich je navíc vždy naráženo na menší možnost predikovatelnosti hodnot nežli u základních trendových funkcí. Toto bylo potvrzeno při testování metody nejmenších čtverců, kde polynomy vyšších řádů nedokázaly vysvětlit regresí vyšší hodnoty koeficientu determinace nežli modely jednodušší, a tak bylo rozhodnuto od nich upustit a vztah vysvětlovat na základě lineární regrese v případě dvou proměnných. V případě jedné proměnné pak byly do analýzy přidány ještě základní trendové funkce.

Dalším otázkou, která vyvstala v průběhu řešení práce, bylo hodnocení efektivity detekovaných kritických bodů v závislosti na velikosti parametru h . V tomto ohledu by bylo možné částečně také uplatnit hodnocení zaváděných při generalizaci liniových prvků. Žádný z algoritmů ani míře uživatelského vstupu nejsou univerzálně použitelné, každý se hodí pro jiné typy liniových prvků, pro jiná modelová území apod. Pro hodnocení by bylo možné využít dvě základní kritéria (McMaster, 1983 v Bayer, 2008) založená na analýze změny polohy generalizovaných bodů (Displacement Analysis):

- Analýza změny ploch (Areal Displacement).
- Analýza změny polohy (Vector Displacement).

Obě analýzy však narážejí na problémy spojené s tím, že se ve skutečnosti nejedná ani o prostorovou generalizaci liniových prvků, ani o výškové zjednodušení liniového prvku, nýbrž pouze o výškové vyhledávání kritických bodů a rozdělování linií. Potenciálně by zde bylo možné do budoucna zavést jakési plošné výškové hodnocení – analýza změny plochy výšky (Height Area Displacement). Nutností by v tomto ohledu bylo implementovat větší množství algoritmů najednou a porovnávat je, protože při implementaci jednoho z nich by bylo většinou dosahováno lepších výsledků při vyšším počtu detekovaných bodů. Pokud bychom to vztáhli na

náš případ, tzn. algoritmus Douglas-Peuckera, došlo by k vykázání lepších výsledků vždy při každém dalším snížení parametru h . To však nebylo náplní a stálo to i mimo možnosti této diplomové práce.

Ze zkušenosti předchozích autorů a po diskuzi byla však pro účel detekce kritických bodů vybrána modifikace algoritmu povětšinou nejlépe hodnoceného – Douglas-Peuckera. Navíc velkou výhodou této práce byla možnost jednotlivě různě volené hodnoty parametru h srovnávat s reálnými časovými hodnotami v síťových analýzách, což ne vždy je realizovatelné. Síťové analýzy tak do jisté míry napomohly tomu, že bylo možné exaktně hodnotit a srovnávat data nad různě rozdělenou silniční sítí, modelovanou vždy stejnými daty z reálného terénního průzkumu, a tím tak hodnotit přesnost detekce kritických bodů za využití různé velikosti parametru h . I toto by mohla být jedna z dalších alternativ pro hodnocení přesnosti detekce kritických bodů u dalších generalizačních algoritmů, tj. s využitím síťových analýz.

Tato alternativa byla zajištěna právě díky převodním rovnicím a získáním takových veličin, které toto spojení dokázaly vytvořit a hodnocení zajistit, což potvrzují i samotné jízdní doby reálné vs. predikované, které souvisí se změnou počtu kritických bodů na síti a pak také jejich polohou.

Kromě problémů však práce přinesla některé radostné zprávy např. právě v podobě testování algoritmu vytvořeného na základě navržené metodiky, které až přeplnilo prvotní očekávání. Kritické body byly detekovány v oblastech globálních/lokálních maxim a minim či v oblasti inflexních bodů či v místech se značnou změnou hodnot sklonu, tzv. úpatnicích. Ukázalo se také, že díky možnosti zadávání prahové hodnoty lze algoritmus přizpůsobit jednak konkrétnímu tvaru terénu, v němž mají být body detekovány, ale také požadavkům uživatele na podrobnost detekce, resp. podrobnosti silniční sítě a vstupních dat DMR. Zároveň lze také výši tohoto parametru nastavovat pro rozličně výškově členité oblasti, tzn. přesně kalibrovat výsledné modely pro jejich efektivnější fungování. Proto alespoň minimální možnost uživatelského vstupu lze celkově považovat za přínosnou, nicméně jejímu přesné použití musí předcházet důkladná analýza vstupních dat, zkoumaného území a účelu výzkumu.

Další využití lze vidět např. v analýze sklonitosti silniční sítě, kde bude možné nalézt skutečné hodnoty podélného sklonu a porovnat je s hodnotami návrhových parametrů pro jednotlivé třídy komunikací, příp. také identifikovat místa, kde tyto limity nejsou splňovány a kde by tak měla být např. dosazena výstražná dopravní značka „Nebezpečné klesání či stoupání“ upozorňující na úsek, kde sklon pozemní komunikace přesahuje určitou hranici (většinou 10 nebo 12 %) nebo kde místní podmínky činí klesání nebezpečným²⁵. To je důležité např. pro navigační účely v cyklistické nebo také nákladní dopravě nejen s ohledem na aktuální rychlost, ale především v zimních měsících, kde by na základě těchto informací mohly být uzavírány jednotlivé nebezpečné úseky díky propojení navigačních datových sad na systém RDS-TMC²⁶ pomocí časových událostí, tj. navigační systémy by v tento moment naváděly řidiče automatizovaně na objízdne trasy, resp. na trasy, kde by tento průjezd byl umožněn bez využití nebezpečných sklonových poměrů.

²⁵ Je-li délka nebezpečného klesání větší než 500 m, doplňuje se značka dodatkovou tabulkou „Délka úseku“ (č. E 4) s uvedením skutečné délky úseku nebezpečného klesání (např. „1 km“, *Zdroj: Besip, 2013*).

²⁶ RDS-TMC (Radio data systém-Traffic Message Chanel) zobrazuje aktuální dopravní informace v mapě navigačního přístroje přímo ve vozidle v průběhu cesty. Řidič je tak prakticky okamžitě informován o všech závažných událostech, které se na jeho trase momentálně vyskytují, a může na ně reagovat svým bezprostředním rozhodnutím (*Zdroj: MD ČR, 2013*).

V automobilové dopravě, jak již bylo řečeno výše, tento faktor nemá takový vliv na samotnou průměrnou rychlost, nicméně co je tímto faktorem velmi ovlivňováno, je spotřeba paliva. Ta s kladnou hodnotou sklonu prudce stoupá, v opačném případě se pak limitně blíží k nule. I toto je jedním ze zajímavých směrů, kde by práce mohla najít své uplatnění, tj. při výpočtech průměrné spotřeby na dané trase a případné optimalizaci těchto tras dle spotřeby paliva.

Výhoda tohoto postupu spočívá především v relativní neměnnosti morfometrie terénu v horizontu let, tzn., že stačí pro aplikaci ve výše uvedených formách síťových analýz jednotlivé hodnoty předpočítat dle vytvořeného algoritmu i za cenu vysokých strojohodin a následně je mít všechny uloženy v perzistentní databázi, ke kterým mohou přistupovat jednotlivé routovací enginy (různé modifikace vyhledávacích algoritmů) a brát si pouze ty údaje, které potřebují pro svoje výpočty, příp. si je ještě dle svých potřeb hierarchizují v různých úrovních a nebo předvypočítávají na základě vložených převodních vzorců či kombinací jednotlivých záznamů v databázi. V praxi tak dojde k mnohem rychlejší odezvě při uživatelském vstupu nežli v případě, kdy by měl daný algoritmus zpracovávat požadavky v režimu „realtime“ a počítat jednotlivé charakteristiky pro vybranou trasu či její optimalizaci až po zadání tohoto požadavku. Zároveň by v tomto ohledu musel být i patřičně modifikován, aby uměl s těmito daty pracovat, což do budoucna není úplně efektivní varianta možného řešení.

V neposlední řadě pak bude možné tuto metodiku uplatnit v oblasti různých variací dostupnostních modelů, tzn. pro hledání základní dopravní obslužnosti i s využitím morfometrie terénu či s přidáním dalších módů dopravy, které jsou na ni nejvíce závislé a pro dopravní obslužnost se zatím nevyužívají – např. právě cyklistika. Nejen základní dopravní modelování, ale i pro další typy síťových úloh by potenciálně měla být tato metodika využitelná, ať už se jedná o cykloplánovače tras, které by mohly využívat různé druhy parametrizací v podobě maximální výškové členitosti, maximálních sklonů, ať už na stanovené trase či dle uživatelských požadavků trasy vyhledávat. To už by však samozřejmě vyžadovalo mít k dispozici takový vyhledávací algoritmus, který dokáže s těmito daty pracovat. I zde je tak určitý prostor pro další vývoj a výzkum v oblasti geoinformačních systémů.

6.2 Závěr

Práce se alespoň částečně pokusila odpovědět na otázku, jestli existuje vztah mezi morfometrickými parametry reliéfu a síťovými analýzami. Tento vztah byl potvrzen již v rešeršní teoretické části. Tato práce však alespoň částečně napomohla tento vztah exaktně vyjádřit za pomoci metodik kartografických generalizačních algoritmů využitých k detekci kritických bodů, které se staly klíčové pro zpřesnění a zapojení dalších výpočtových proměnných do převodních rovnic, konkrétně morfometrického parametru křivost. Bohužel zde se úplně nepodařilo potvrdit tento vztah. Nicméně metodika se jako první pokusila naznačit, jak ji do budoucna do těchto výpočtů začlenit tím, že dokázala určit její hodnoty pro liniové prvky (cestní síť) v reliéfu v závislosti na jejich povrchové délce a směru. Vliv na celkovou velikost a změnu pohybového vektoru však vyžaduje začlenění ještě dalších proměnných pro potvrzení vztahu tohoto parametru terénu.

Navíc je třeba říci, že zde chybí exaktní geoinformační nástroje pro potvrzení vypočtených morfometrických hodnot druhého řádu u liniových prvků. Vizualní testování vybraných kritických úseků s různým průběhem, směrem, délkou či výškovým profilem nabídlo

sice postačující výsledky, ale korektní hodnocení by vyžadovalo ještě dalšího nástroje, příp. rozsáhlý terénní výzkum. O němž se však domnívám, že by byl jen velmi obtížně realizovatelný a jeho výsledky by mohly být zkreslující.

I toto jsou jedny z možných směrů, kam by se mohlo ubírat další pokračování této práce v oblasti výzkumu na straně geoinformačních systémů. V oblasti aplikační pak bude nutné dát dohromady jednotlivé výzkumné práce, které byly na téma dostupnosti vytvořeny a využít je pro tvorbu unikátní metodiky a nástroje, který spojí výhody všech předešlých, začlení do výpočtových schémat další zkoumané parametry a využije je pro účely vytvoření přesného dostupnostního modelu, který by se mohl stát standardem jak oblasti cyklo navigačních databází, tak také např. za určitých úprav i pro další módy dopravy.

Tato práce se na splnění tohoto účelu podílela alespoň částečně tím, že dokázala vyřešit problematiku automatizace výpočtu sklonu pro oba směry digitalizovaných linií, zohlednila tak do výsledné cestovní doby i směr jízdy, což momentálně na trhu nenabízí ani nejlepší plánovače tras. Zároveň také nabídla tento výpočet více zpřesněným způsobem za využití reálných délek silničních úseků po povrchu a za pomoci detekce kritických bodů na této síti PK. Tato metodika zároveň také může např. sloužit pro detekci potenciálně kritických úseků z hlediska nesplnění norem ČSN v oblasti sklonitosti, ale také být nápomocna při určování přechodnic, či výškových oblouků záviselých na křivosti komunikace v oblasti silničního hospodářství, příp. při hledání maximálních výškových hodnot při výstavbě liniových staveb.

Do jisté míry také může tato práce vhodně doplnit některé daleko složitější programy pro dopravní modelování, mikromodelování dopravních vztahů a dostupností.

Zároveň také může metodika výpočtů křivosti a sklonu sloužit v jiných oblastech geografie – jako je např. hydrologie či geomorfologie při určování křivosti svahově podmíněných procesů v různých směrech a vzdálenostech. To vše samozřejmě za určitých výpočetních úprav a korekcí.

Je také jisté, že nepřesnosti vznikající v této práci byly způsobeny nejen nepřesnostmi daných metod, jak bylo popsáno výše, ale také nepřesnostmi samotných vstupních dat a následných postupů nutných pro jejich zpracování do požadovaných formátů. U DMR se jednalo především o interpolaci vstupní mřížky bodů, u silniční sítě především o přesnost v podobě její geometrie a sémantické náplně. Další uplatnění metodiky tak bude do budoucna záviset především na dostupnosti a přesnosti jednotlivých datových sad, které do ní budou vstupovat, proto i zde bude potřeba stále zdokonalovat a zpřesňovat výškopisná data a algoritmy, které je dokáží, nejlépe bezztrátově, zpracovat do podoby dat využitelných pro tento, navazující či podobné nástroje a metodiky. Zároveň také bude třeba dále zlepšovat polohovou přesnost dat a zvyšovat jejich sémantickou náplň o atributy, které umožní využití dalších parametrů, nejlépe v reálném čase, pro zpřesnění stávajících metodik, nástrojů a modelů, propojí je jednoduše díky jejich interoperabilitě na další systémy, které ve výsledku umožní snadnou implementaci pro každého uživatele, který tak bude mít ty nejpřesnější nástroje a technologie přímo ve svých rukou.

SEZNAM ZDROJŮ INFORMACÍ

Odborná literatura

- BARTOŠ, J. (2011): *Zohlednění křivolakosti komunikací v síťových analýzách v prostředí GIS*. Praha. 60s. Diplomová práce. Univerzita Karlova. Katedra Aplikované geoinformatiky a kartografie.
- BRAINARD, J., LOVETT, A., BATEMANN, I. (1997): *Use isochrone surfaces in travel-cost models*. Journal of Transport Geography, 5, č. 2. Elsevier, The Netherlands, s. 117 – 126.
- BRINKE, J. (1999): *Úvod do geografie dopravy*. 1. vyd., Univerzita Karlova, Praha, ISBN 80-7184-923-5, 1999. 112s.
- BAYER T. (2008): *Algoritmy v digitální kartografii*. Karolinum 2008, ISBN 9788024614991. 252 str.
- CENIA (2012): *D2.8.I.7 INSPIRE Data Specification on Transport Networks – Guidelines*.
- CUZK (2009): *Základní báze geografických dat ZABAGED*, Zeměměřický úřad, Praha, 2009.
- ČSN 73 61 00 (1992): *Názvosloví silničních komunikací*, schválena 6. 7. 1983, doplněna 1. 8. 1992.
- ČSN 73 61 01 (1992): *Projektování silnic a dálnic*, schválena 6. 7. 1983, doplněna 3. 8. 1994.
- ČSN ISO 19113 (2004): *Geografická informace - Zásady jakosti*, schválena 12/2002, doplněna 08/2004.
- ČSN ISO 19114 (2004): *Geografická informace – Postupy hodnocení jakosti*, schválena 06/2003, doplněna 05/2005.
- ČSN ISO 19115 (2004): *Geografická informace - Metadata*, schválena 06/2003, doplněna 10/2004.
- ČÁBELKA, M. (2008): *Úvod do GPS*. PřF UK, Katedra Aplikované kartografie a geoinformatiky, 2008. 73 s.
- DEMEK, J. 1987. *Obecná geomorfologie*. 1. vyd. Praha : Academia, 1987. 476 s.
- DAUNORAS J., BAGDONAS V., GARGASAS V. (2008): *CITY TRANSPORT MONITORING AND ROUTES OPTIMAL MANAGEMENT SYSTEM*, Dept of Control Technology, Kaunas University of Technology, TRANSPORT, 2008.
- DIJKSTRA E. W. (1959): *A note on two problems in connexion with graphs*. In: Numerische Mathematik. 1, 1959, p. 269–271.
- FLINSENBURG, I. (2004): *Route Planning Algorithms for Car Navigation*, Technische Universiteit Eindhoven, 2004, Proefschrift. - ISBN 90-386-0902-7, 200 p.
- FRANK, A.U. (1992): *Spatial concept, geometric data models, and geometric data structures*. - Computer and Geosciences 18, 409-417.
- GOODCHILD, M.F. (1992): *Geographic information science*. International Journal of Geographic Information Systems 6, 31-45.

- GOODCHILD, M.F. (1992b): *Geographical data modeling*. Computers and Geosciences 18, 401-408.
- GREENE, D. (1997): *Sustainable transport*. *Journal of Transport Geography*, 5, č. 3. Elsevier, The Netherlands, 1997. s.177-190.
- GUTIÉRREZ, J., GÓMEZ, G. (1999): *The impact of orbital motorways on intra-metropolitan accessibility: the case of Madrid's M-40*. *Journal of Transport Geography*, 7, č.1. Elsevier, The Netherlands, 1999. s.1-15.
- GUTIÉRREZ, J., URBANO, P. (1996): *Accessibility in the European Union: the impact of the trans-European road network*. *Journal of Transport Geography*, 4, č. 1. Elsevier, The Netherlands, s. 15 -25.
- HENTSCHEL M., LECKING D., WAGNER B. (2007): *DETERMINISTIC PATH PLANNING AND NAVIGATION FOR AN AUTONOMOUS FORK LIFT TRUCK*, Institute for Systems Engineering, Real Time Systems Group Leibniz Universität Hannover, 6 p.
- HLÁSNÝ R. (2010): *Modelování procesů prostorových analýz pro detekci problémových míst na cyklostezkách ve městě Pardubice*, Univerzita Pardubice, Fakulta ekonomicko-správní, Diplomová práce, 60 s.
- HUDEČEK, T. (2009): *Akcesibilita a dopady její změny v Česku v transformačním období*. Praha. 119 s. Dizertační práce. Univerzita Karlova. Katedra sociální geografie a regionálního rozvoje.
- HUDEČEK, T. (2011): *Dostupnost v Česku v období 1991–2001: vztah k dojížděcí do zaměstnání a do škol*. Praha. 144 s., ISBN 978-80-904521-4-5, 1. vydání, 2010.
- ISO (International organization for standardization) 14 852 (2002): *Intelligent transport systems — Geographic Data Files (GDF) — ISO/TC 204, Overall data specification (Revision of ISO/TR 14825:1996)*, 2012.
- JAROLÍMEK, J. (2005): *Analýza dopravní obslužnosti v okrese Benešov* [rukopis]. Plzeň, ZČU, Pedagogická fakulta, 2005. 57s.
- JAROŠ J. (2011): *Detekce linií terénní kostry z dat laserového skenování*. 70s. Diplomová práce. Univerzita Karlova. Katedra Aplikované geoinformatiky a kartografie.
- KADLČÍKOVÁ J. (2007): *DMR a jeho vizualizace*, Katedra geoinformatiky, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Palackého v Olomouci, 15 s.
- KRCHO, J. (1990): *Morfometrická analýza a digitálne modely georeliéfu*. Slovenská akadémia vied, Bratislava.
- KUFNER J. (2010): *Historicko-geografická analýza dostupnosti Prahy silniční dopravou pomocí GIS*. Praha. 55s. Bakalářská práce. Univerzita Karlova. Katedra Aplikované geoinformatiky a kartografie.
- KUSEDOVÁ, D. (1996): *Analýza dostupnosti obcí Slovenska*. Sborník referátů Aktivity v kartografii. Kartografická spoločnosť SR/Geografický ústav SAV, Bratislava, 1996. s.29-49.
- LI, S., SHUM, Y. (2001): *Impacts of the National Trunk Highway System on accessibility in China*. *Journal of Transport Geography*, 9, č.1. Elsevier, The Netherlands, s. 39-48.
- LOUTHAN, M. (2010): *Vztah digitálního modelu reliéfu a síťových analýz při řešení dopravních úloh*. Olomouc. 68 s. Diplomová práce. UPOL. Katedra geoinformatiky.

- MCMMASTER, R.B. (1987): The geometric properties of numerical generalization. *Geographical Analysis* 19, 330–346.
- MD ČR (2006): *TP 179 - NAVRHOVÁNÍ KOMUNIKACÍ PRO CYKLISTY, MD–OPK č.j. 158/06-120-RS/1, 3/2006.*
- MORRIS, J.M., DUMBLE, P.L., WIGAN, M.R. (1978): *Accessibility indicators for transport planning.* *Transportation Research* 13A, 1978. s.91-109.
- MOWEN X., TETSURA E., MEIFENG C. (2004): *A GIS-based method for locating the critical 3D slip surface in a slope,* *Computers and Geotechnics* 31 (2004), p. 267–277.
- NOVÝ, V. (2008): *Hodnocení dostupnosti služeb Plzeňského kraje pomocí síťových analýz [rukopis].* Praha: UK, Přírodovědecká fakulta, 2008. 69s.
- NUTLEY, S. (1996): *Rural transport problems and non-car populations in the USA – A UK perspective.* *Journal of Transport Geography*, 4, č. 2. Elsevier, Great Britain, s. 93-106.
- PANTŮČKOVÁ T. (2012): *Síťové analýzy v GIS,* Praha, FS ČVUT, 197 s.
- PEŇÁZ, T. (2006): *Síťové analýzy v prostředí GIS.* VŠB, Technická univerzita Ostrava, 2006. 29s.
- SCHMIDT J., EVANS I., BRINKMANN J. (2003): *Comparison of polynomial models for land surface curvature calculation,* NT. J. GEOGRAPHICAL INFORMATION SCIENCE, 2003, VOL. 17, NO. 8, 797–814.
- SUXIA L., XUAN Z. (2004): *Accessibility Analyst: an integrated GIS tool for accessibility analysis in urban transportation planning,* *Environment and Planning B: Planning and Design* 2004, volume 31, pages 105-124.
- SMOLOVÁ, I., VÍTEK, J. (2007): *Základy geomorfologie – vybrané tvary reliéfu.* Vydavatelství Univerzity Palackého, Olomouc, UP.
- SPENCE, N., LINNEKER, B. (1994): *Evolution of the motorway network and changing levels of accessibility in Great Britain.* *Journal of Transport Geography*, 2, č.4. Elsevier, The Netherlands, s.247-264.
- ŠEDA, M. (2003): *Teorie grafů.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, 89s.
- ŠRÁMEK, P. (2011): *Hodnocení kvality prostorových dat pro zvolené typy prostorových analýz* Univerzita Pardubice Fakulta ekonomicko-správní, Diplomová práce, 70 s.
- ŠTYCH, P. a kol. (2008): *Vybrané funkce geoinformačních systémů.* Praha: CITT Akademie kosmických technologií, 2008. 78s.
- TÁZLAR, J. (2012): *Modelování cyklo dopravy ve městě Olomouci.* Olomouc, UPOL, katedra geoinformatiky, Diplomová práce, 70 s.
- THILL J. C. (2000): *Situace geografických informačních systémů pro dopravu.* Department of Geography and National Center for Geographic Information and Analysis, State University of New York at Buffalo, Buffalo, NY 14261 USA.
- TINGSHENG W., CHUANG S.W. (2008): *A Study of the Transport Route from Different Angles.* 7th WSEAS Int. Conf. on APPLIED COMPUTER & APPLIED COMPUTATIONAL SCIENCE (ACACOS '08), Hangzhou, China, April 6-8, 2008.
- URŠULÁK T., PACINA J. (2010): *3D modelování,* Centrum pro virtuální krajinu a modelování reality, Ústí nad Labem 2010, 63 s.

- VELHARTICKÝ, D. (2006): *Testování výškové presnosti navigacní GPS pro účely (cyklo)turistiky*, Fakulta aplikovaných ved Katedra matematiky ZCU, Bakalářská práce, 37 s.
- VEVERKA, B. ZIMOVÁ, R. (2008): *Topografická a tematická kartografie*. Praha, Vydavatelství ČVUT, 2008. 198 s.
- VOŽENÍLEK, V. a kol (2001): *Integrace GPS/GIS v geomorfologickém výzkumu*. Olomouc, Vydavatelství Univerzity Palackého, Olomouc, UP.
- Vyhláška č. 104/1997 Sb. kterou se provádí zákon o pozemních komunikacích.
- Zákon č. 13/1997 Sb. o pozemních komunikacích, ve znění pozdějších předpisů.
- Zákon č. 56/2001 Sb. o kategorizaci vozidel v ČR ve znění pozdějších změn.
- ZHILIN, L. (2007): *An Examination of Algorithm for the Detection of Critical Points on Digital Cartographic Lines*, The Cartographic Journal 1995, Curtin University of Technology, Perth, West Australia, 5 s.
- ZHILIN L., OPENSHAW S. (1993): *A Natural Principle for the Objective Generalization of Digital Maps*, Cartography and Geographic Information Systems 1993.
- ZVÁRA, K. (2008): *Regrese*, MatFyz Press Praha, 249 s.
- ŽALLMANOVÁ, E. (2005): *Utváření reliéfu České republiky, Geomorfologické členění ČR, typy reliéfu ČR, Ústav zahradní a krajinářské architektury MZLU, Brno.*
- ŽDÁNSKÝ R. (2012): *TESTOVÁNÍ VÝŠKOVÉ PŘESNOSTI GIS GPS PŘIJÍMAČŮ*, UK v Praze, Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie, Bakalářská práce, 46 s.

Datové zdroje

- ArcData Praha (2013a): *Digitální model reliéfu ČR - SRTM*. Dostupné z WWW: <<http://www.arcdata.cz/produkty-a-sluzby/geograficka-data/digitalni-model-reliefu-cr>>.
- ArcData Praha (2013b): *Digitální vektorová geografická databáze České republiky ArcČR 500*. Dostupné z WWW: <<http://www.arcdata.cz/produkty-a-sluzby/geograficka-data/arc-cr-500/>>.
- CEDA (2012): *Technická dokumentace – popis dat, StreetNET, komunikace*, verze: 1211.
- CENIA (2007): *DMÚ 25 - Katalog topografických objektů, Katalog objektů a atributů DMÚ 25, VGHMÚř Dobruška.*
- CUZK (2013): *Katalog objektů ZABAGED*, verze 2.4, ve znění dodatku č.1, Praha 2013.
- CUZK (2010): *Technická zpráva k DMR-4G*, verze 1.0, ve znění dodatku č.1, Praha 2010.
- GEODIS (2013): *Digitální modely terénu*, Dostupné z WWW: <<http://sluzby.geodis.cz/sluzby/digitalni-modely-terenu>>.
- GISAT (2013): *Digitální model terénu - SPOT 3D, ASTER GDEM a MONA PRO*, 2013. Dostupné z WWW: <<http://www.gisat.cz/content/cz/produkty/digitalni-model-terenu>>
- NAVTEQ (2006): *NAVSTREETS Street Data Reference Manual v2.0_Q2-2006*.
- ŘSD ČR (2012): *Uzlový lokalizační systém (ULS)*, Principy a zásady, 2012.
- T-MAPY (2012): *Geografická data* [online]. Dostupné z WWW: <<http://www.tmapy.cz>>.
- TomTom (2008): *UserGuide MultiNet*, 2008/07.

TomTom (2007): *MultiNet DataModel*, 3-4-2-1_Final_1-0.

USGS (2013): *Elevation products - GMTED2010, GTOPO30, SRTM*. Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. Dostupné z WWW: <<http://eros.usgs.gov/elevation-products>>.

Online zdroje

ArcData Praha (2012): *Digitální model reliéfu ČR*. Dostupné z WWW:

<<http://www.arcdata.cz/produkty-a-sluzby/geograficka-data/digitalni-model-reliefu-cr>>.

BERÁNEK, L. (2008): *Síťová analýza v marketingu*. [PDF online]. Katedra informatiky, Jihočeská Univerzita, České Budějovice. [cit. 2010-03-27]. Dostupný z WWW:

<<http://znanosti2008.fiit.stuba.sk/download/articles/znanosti2008-Beranek.pdf>>.

BESIP (2013): *Bezpečnost silničního provozu*, Dostupné z WWW <<http://www.ibesip.cz/>>

BOHÁČ, Š. (2006): *CYKLOSTEZKY A CYKLOTRASY – TERMINOLOGIE*, Magistrát hl. m. Prahy, Dostupné z WWW: <[http://doprava.praha-mesto.cz/\(e2ozu22b3uxsi5i5mxso3d45\)/files/=45986/Cykloterminologie.pdf](http://doprava.praha-mesto.cz/(e2ozu22b3uxsi5i5mxso3d45)/files/=45986/Cykloterminologie.pdf)>

BRÜGELMANN, R. 2000. *Automatic breakline detection from airborne laser range data*, International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing [online]. Amsterdam : ISPRS, 2000 [cit. 2013-08-01]. Volume 33, Part B3, p. 109 – 116. Dostupné z URL: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXIII/congress/part3/109_XXXIII-part3.pdf>

CENIA [online]. *Portál veřejné správy 2010* [2013-08-12]. Dostupné z WWW:

<http://www.portal.gov.cz/wps/portal/_s.155/703/.cmd/ad/.c/311/.ce/10823/.p/8413/_s.155/770?PC_8413_1=361/2000&PC_8413_ps=10&PC_8413_p=18>.

CENTRUM (2013): *Mapy centrum*, [2013-08-05]. Dostupné z WWW:

<<http://amapy.centrum.cz>> .

Český normalizační institut (2000): *Československá státní technické norma 73 6101 – Projektování silnic a dálnic*. Fakulta Stavební, VUT. Dostupné z WWW: <<http://www.fce.vutbr.cz/PKO/0M2/CSN736101-000-040.pdf>>.

ESRI (2012): *ArcGIS 10.1 Help, Add Surface Information (3D Analyst)*. Dostupný z WWW:

<http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/Add_Surface_Information/00q900000016000000/>.

ESRI (2013): *ArcGIS 10.1 Desktop help*, Dostupné z WWW:

<<http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/10.1/index.cfm?TopicName=welcome>>

FTK UPOL (2012): *PRESKRIPCE PROGRAMU POHYBOVÉ AKTIVITY*. [2013-08-05], Dostupné z WWW: <<http://www.upol.cz>>.

GOOGLE (2013): *Google mapy* [2013-07-05]. Dostupné z WWW: <<http://maps.google.cz>>

HORÁK, J., PEŇÁZ, T., RŮŽIČKA, L. (2004): *Hodnocení dopravní dostupnosti zaměstnavatelů* [PDF online] Sbor. ref. mezinárodního symposia GIS, Ostrava, 16 s. ISSN 1213-2454. Dostupný z WWW: <http://gis.vsb.cz/gacr_mtp/Clanky/dostupnostobrOV04u.pdf>.

HRTOŇ, A. (2011): *Procesní analýza Vodní záchranné služby*, Masarykova univerzita Fakulta informatiky. Dostupné z WWW: <http://is.muni.cz/th/256273/fi_b/BP_Adam_Hrton.pdf>

- IDNES (2013): *Mapy Idnes*, [2013-07-05]. Dostupné z WWW: <<http://mapy.idnes.cz>>
- MD ČR (2013): *Jednotný systém dopravních informací*, *Dopravniinfo.cz* [2013-08-05]. Dostupné z WWW: <<http://www.dopravniinfo.cz>>
- MICHELIN (2013): *Viamichelin route planner*, [2013-08-05]. Dostupné z WWW: <<http://www.viamichelin.com>>
- NOKIA, NAVTEQ (2013): *Here.com, 2010* [2010-08-05]. Dostupné z WWW: <<http://www.here.com>>
- PYTHON (2013): *Programovací jazyk Python*, [2013-07-20]. Dostupné z WWW: <http://www.py.cz/FrontPage>
- REICHL, J. (2013): *Těleso na nakloněné rovině*, *Encyklopedi fyziky*, c2006 - 2013. Dostupné z WWW: <<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1540-teleso-na-naklonene-rovine>>.
- ŘEZNÍK, T. (2006): *Mapové zdroje učebních textů*. Dostupné z WWW: <http://www.geogrmelec.org/materialy/iframes/MapZ/MapZ_dzdroje_05.pdf>.
- ŘSD (2013): *Provozní staničení*. Dostupné z WWW: <<http://www.rsd.cz/doprava/atrhlp/hs631.htm>>.
- SEZNAM (2013): *Mapy.cz*, [2013-07-05]. Dostupné z WWW: <<http://www.mapy.cz>>
- SLADKÝ, J. (2007): *Nalezení optimálního spoje MHD využitím grafových algoritmů*. [PDF online]. Západočeská univerzita v Plzni. Dostupný z WWW: <http://www.gis.zcu.cz/studium/dp/2007/Sladky__Nalezeni_optimalniho_spoje_MHD_vyuziti_m_grafovych_algoritmu__BP.pdf>.
- SPS KARVINÁ (2005): *Výpočet vzdálenosti bodu od přímky*, SPŠ Karviná, Dostupné z WWW: <http://www.spskarvina.cz/www/1ct2005/manual/data/matematika/VYUKA/08.analytika_geometrie/2.anal_geom_v_rovine/6.vzdalenost_bodu_od_primky.pdf>
- ŠKODA AUTO (2013): *Plánovač tras Škoda Auto*, [2013-08-05]. Dostupné z WWW: <<http://www.skoda-auto.cz/cze/applications/routeplanner/pages/routeplanner.aspx>>
- TOM TOM (2013): *Route Planner* [2013-08-05]. Dostupné z WWW: <<http://routes.tomtom.com>>
- VŠB Ostrava (2012): *Úvodní informace o geografických datech*, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (2012). Dostupný z WWW: <http://gis.vsb.cz/gacr_pan/Brozura/PrilohaGisData.html>.
- VUT (2012): *Výpočet výškového polygonu a zaoblení nivelety*, Fakulta stavební VUT Brno. Dostupný z WWW: <<http://www.fce.vutbr.cz/PKO/0M2/PREDN5/vypocet.htm>>.
- VÚGTK (2013): *Terminologický slovník zeměměřičství a katastru nemovitostí* [online], c2005-2011. [cit. 2013-08-22]. Dostupné z URL: <<http://www.vugtk.cz/slovník>>.
- Wikipedia (2008), *The Free Encyclopedia (2012)*. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:PrubehFunkce.svg>>.
- Wikipedia (2011), *The Free Encyclopedia (2012)*. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Stationary_vs_inflection_pts.svg>.

Seznam příloh

- Příloha 1: Datové sady obsahující síťové modely dopravy PK v ČR
- Příloha 2: Sémantická (atributová) náplň datových sad PK
- Příloha 3: Digitální modely terénu pokrývající území České republiky
- Příloha 4: Mapa oblasti terénního měření včetně typu povrchu jednotlivých PK
- Příloha 5: Trasy měření a sklonitost území
- Příloha 6: Hodnocení cyklistických dostupnostních modelů
- Příloha 7: Hodnocení SW řešení výpočtových metod sklonu s využitím exp. modelu
- Příloha 8: Výškové grafy pro jednotlivé geomorfologické útvary
- Příloha 9: Trasa 1, kombinovaná (převážně zpevněná)
- Příloha 10: Trasa 2, zpevněná (asfalt)
- Příloha 11: Trasa 3, kombinovaná
- Příloha 12: Trasa 4, nezpevněná
- Příloha 13: Trasa 5, zpevněná (asfalt)
- Příloha 14: Matice rychlostí dostupnostních modelů [km/h]
- Příloha 15: Konceptuální model postupu tvorby korektně ohodnocené datové sady
- Příloha 16: CD s elektronickou podobou práce a nástrojem do SW GIS

Příloha 1. Datové sady obsahující síťové modely dopravy PK v ČR

Datová sada	Pokrytí Aktualizace	Polohová přesnost Měřítko Topologie	Datový formát/Souř. systém	Vlastník/správce a dostupnost / forma distribuce	Účel a užití dat	Původ a způsob sběru dat a určení polohy	Datové struktury Metadata	Standards kvality ISO / jiné normy
Uzlový lokalizační systém	dálnice a silnice I.-III.tř. (celkem 59.500 km) 2x /rok	intrav. ±10m extrav. ±15m M 1:25 000 ANO	ESRI/JTSK	MD ČR/ŘSD ČR volně ke stažení bezešvá databáze v celém rozsahu České republiky	Síťový model pro evidenci majetku pro vlastníky a správce PK stát, ŘSD ČR, kraje	Především odměřováním délek v uzlovém a provozním staničení	Zásady pro osazování UB Metadata: pouze stav sady k RR/MM	ČSN ISO 19113
StreetNET (GN)	dálnice, silnice, místní a vybrané úcel.kom. (celkem 300.000 km) 2x /rok	intrav. ±5m extrav. ±10m M 1:10 000 GN přebírá geometrie StreetNet ANO	ESRI/JTSK,WGS 84, S42	CEDA JSDI: licenc.ŘSD pro ostatní subjekty zpoplatněno bezešvá databáze v celém rozsahu České republiky	Síťový model pro navigaci, evidenci dopravních událostí v JSDI, a dále IZS, PČR, kraje aj.	Především sběr v terénu – souřadnicemi, tracklogy, ortofoto, mobilní obrazové mapování technologií MoMa. Dále datové zdroje ŘSD a další.	Technická dokumentace Global Network 201106 Metada: pouze stav sady k RR/MM	ISO ²⁷ GDF5.0 standard - ISO 14825:2011 (Geographic Data Files)
ZABAGED*	PK: dálnice, silnice, místní a většina úcel. kom. (vrstvy	Existuje 5 úrovní přesností: Přesnost	DGN/Shapefile XML/GML/DXF JTSK	ČÚZK, Zeměměřický úřad obchodní e-portál ČÚZK	Státní mapové dílo	Sběr souřadnicemi geodeticky v terénu, fotogrametricky, od externích správců na	Katalog objektů ZABAGED Metadata:	ČSN ISO 19113 INSPIRE

²⁷ Dalším standardem zabývajícím se kvalitou prostorových dat a jejími prvky je evropský standard GDF (Geographic Data File), který byl vyvinut v polovině osmdesátých let. Později byl vydán jako evropská norma CEN TC 278 v roce 1995, v současné době je v ČR v platnosti jako ČSN EN ISO 14825: Inteligentní dopravní systémy – Geografické datové soubory – Celková datová specifikace z roku 2004. Tato norma byla navržena pro popis a transfer dat, týkajících se silniční sítě v dopravě. Norma je v tomto případě především zajímavá tím, že řeší kvalitu prostorových dat a zahrnuje některé prvky kvality, které nejsou zmíněny v žádné z dále uvedených norem. Norma kromě polohové a tematické přesnosti a úplnosti zavádí prvky kvality jako je rozlišení či správnost. Prvek časová přesnost je v této normě nahrazen prvkem aktualizace. Aktualizace zahrnuje charakteristiky jako je datum šetření, rychlost stárnutí dat, průměrné datum zjišťování a maximální stáří položek datasetu. Norma dále zavádí pojem preciznost, která vyjadřuje skutečnost, že podobná (blízká) měření by měla být prováděna za podobných podmínek pomocí stejných technik (Zdroj: ISO 14 825, 2002).

Příloha 1. Datové sady obsahující síťové modely dopravy PK v ČR

Datová sada	Pokrytí Aktualizace	Polohová přesnost Měřítko Topologie	Datový formát/Souř. systém	Vlastník/správce a dostupnost / forma distribuce	Účel a užití dat	Původ a způsob sběru dat a určení polohy	Datové struktury Metadata	Standardy kvality ISO / jiné normy
	odděleně) a ostatní dopravní módy Pozn. *)	komunikací a budov do 5m. Ostatní třídy jsou: do 15m a do 30m. M 1:10 000 ANO		po mapových listech		smlouvu nebo i z internetu.	Tvorba dle normy ČSN ISO 19115	
DMÚ 25	PK: dálnice, silnice, místní, účel. kom. 1x/3-7 let	Existují 4 úrovně přesnosti: Přesnost komunikací (polohopis) ±10m (5-20 m). M 1:25 000 ANO	ESRI Shape File ARC/INFO Export File DGN/Shapefile XML/GML S42, WGS 84, JTSK	VGHMÚř Dobruška CENIA – Česká informační agentura životního prostředí po mapových listech	Státní mapové dílo	Využívání leteckých měřických snímků ve výrobních technologiích VGHMÚř	Katalog topografických objektů CENIA Metadata: Tvorba dle normy ČSN ISO 19115	ČSN ISO 19113
ArcČR 500	PK: dálnice, silnice, místní komunikace 1x/3-7 let	Přesnost komunikací (polohopis) ±100m (min 200 m). M 1:200 000 ANO	ESRI ShapeFile, souborová geodatabáze GDB S 42, S-JTSK	CUZK/ARCDATAPraha, s.r.o., Zeměměřický ústav bezešvá databáze v celém rozsahu České republiky	Bezešvá geograficko informační databáze v celém rozsahu ČR	Vektorizace generalizovaných map měřítka 1 : 200 000	Popis dat ArcČR v. 3.0 viz ODKAZ Nejsou k dispozici	-
NAVSTREETS	PK: dálnice, silnice, místní a účelové komunikace	není známa M 1:10 000 ANO	SIF+ - vlastní formát NAVTEQ, ESRI Shapefile, RDF, MapInfo	Nokia / Navteq pro ostatní subjekty zpoplatněno	Síťový model pro navigaci,	Především sběr v terénu – souřadnicemi, tracklog, mobilní	NAVTEQ's NAVSTREETS Street Data Reference	EN ISO 14825:2004 GDF 4.0 standard

Příloha 1. Datové sady obsahující síťové modely dopravy PK v ČR

Datová sada	Pokrytí Aktualizace	Polohová přesnost Měřítko Topologie	Datový formát/Souř. systém	Vlastník/správce a dostupnost / forma distribuce	Účel a užití dat	Původ a způsob sběru dat a určení polohy	Datové struktury Metadata	Standardy kvality ISO / jiné normy
	(celkem 228 000 km)		Format, Oracle Spatial / WGS 84 (ODF)	bezešvá databáze v celém rozsahu České republiky		mapování Nokia.	Manual	
Multinet	PK: dálnice, silnice, místní a účelové komunikace (celkem 171.000 km) 4x ročně	intrav. ±5m extrav. ±10m M 1:10 000 ANO	GDF ASCII Relational GDF ASCII Sequential Shapefile Oracle Spatial / WGS 84	TomTom pro ostatní subjekty zpoplatněno bezešvá databáze v celém rozsahu České republiky	Síťový model pro navigaci,	Především sběr v terénu – souřadnicemi, tracklogy, ortofoto, mobilní mapování TomTom (dříve TeleAtlas)	Multinet data model	EN ISO 14825:2004 GDF 4.0 standard

* Aktualizace ZABAGED probíhá průběžně (poslední mezi lety 2009-2013). Datový model ZABAGED je velmi rozsáhlý. Mezi datové sady obsahující síťové modely dopravy je zařazen pro topologickou čistotu datových vrstev dopravy. Primárně byl však ZABAGED budován jako datová báze pro tvorbu státního mapového díla. ZABAGED jako významný zdroj dat pořizovaný pro státní mapové dílo ČR obsahuje širokou bázi informací všech dopravních módů a jeho kvalita je definována legislativou ČR a dalšími metodikami (CUZK, 2010).

Zdroj: jednotlivé datové zdroje - ArcData (2013b), CEDA (2012), CENIA (2007), CUZK (2013), NAVTEQ (2006), ŘSD (2012), TomTom (2008) + šetření a úpravy autora

Příloha 2. Sémantická (atributová) náplň datových sad PK

Datová sada ²⁸	Třída komunikace	Funkční kategorizace (funkce a význam)	Směr dopravního provozu	Informace o pohybu (manévry) na cestní síti	Speed and Vehicle Restrictions (rychlostní a vozidlová omezení)	Příslušnost k intravilánu	Povrch komunikace	Deviatilita či křivolakost komunikací	Komunikace vhodné pro cyklo dopravu	Intenzita provozu a skladba dopravy	Podélný sklon komunikace	Celkový počet bodů
Uzlový lokalizační systém	ANO	NE*	NE**	NE	NE	NE**	ANO	NE	NE	ANO	ANO	4/11
StreetNET (GN)	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	NE	ANO	ANO	NE	9/11
ZABAGED	ANO	NE***	NE**	NE	NE	NE*****	ANO***	NE	NE****	ANO	NE	4/11
DMU 25	ANO	ANO	NE**	NE	NE	ANO	ANO*****	NE	ANO	NE	ANO*****	6/11
ArcČR 500	ANO	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	1/11

*pouze základní vymezení na dálnice a silnice, **pouze u oddělených jízdních pásů (dálnice a rychlostní komunikace), ***datové vrstvy silnice, ****pouze oddělení stezek pro pěší a cyklo dopravu, *****pouze u vybraných záznamů v datové sadě, *****možnost využití datových sad ZABAGED (osídlení)

Zdroj: jednotlivé datové zdroje – ArcData (2013b), CEDA (2012), CENIA (2007), CUZK (2013), ŘSD (2012) + úpravy a šetření autora

²⁸ Pro ČR jsou zhotovována navigační data o pozemních komunikacích (dále jen PK) společnostmi TeleAtlas (dodavatel CEDA) a NAVTEQ. Technickou dokumentaci k datům za ČR (ani data samotná) společnosti NAVTEQ se nepodařilo získat z důvodu zachování obchodního tajemství. Avšak je zde určitá analogie dat NAVTEQ s datovými produkty vytvářenými ve společnosti CEDA, proto lze hodnocení datové sady StreetNET použít pravděpodobně i na data NAVTEQ, proto i tato příloha uvádí pouze datovou sadu CEDA a data NAVTEQ a TomTom chybí. Také další datová sada GN (CEDA) nebyla samostatně hodnocena, protože StreetNET plně vytváří její geometrii a atributy, které GN pouze obohacuje o další.

Příloha 3. Digitální modely terénu pokrývající území České republiky

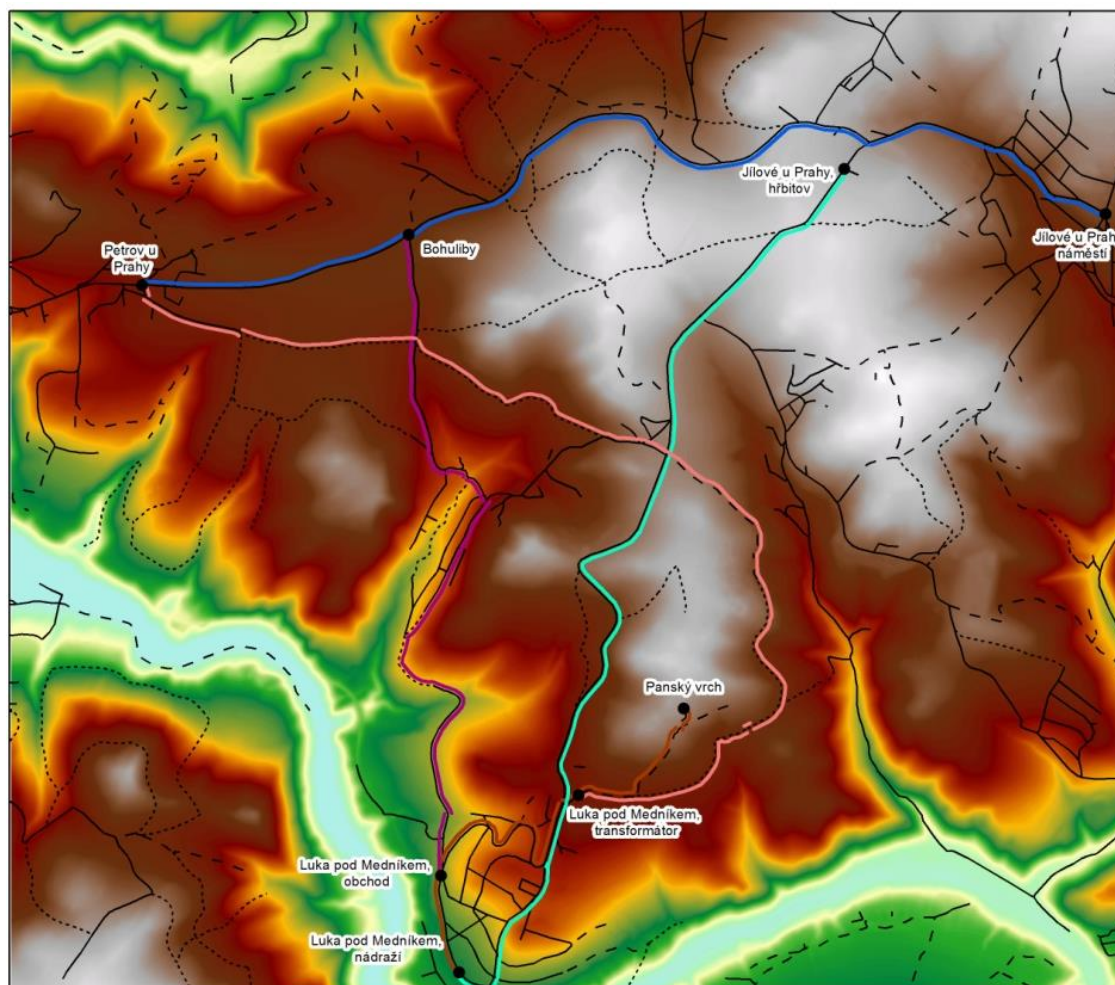
Datová sada	Typ dat	Polohová přesnost	Výšková přesnost	Prostorové rozlišení	Dostupnost	Pokrytí území ČR	Rok aktualizace (časová přesnost)	Standardy kvality / Metadata
ZABAGED – 3D vrstevnice	DGN, SHP	10 m	0,7-1,5 m v odkrytém terénu, 1-2 m v sídlech a 2-5 m zalesněný terén	-	ČÚZK, Zeměměřický úřad obchodní e-portál ČÚZK	100 %	2005 -2013	ISO19115 2003/Cor.1:2006 , INSPIRE
ZABAGED – výškopis grid	rastr	10 m	0,7-1,5 m v odkrytém terénu, 1-2 m v sídlech a 2-5 m zalesněný terén	10 x 10 m	ČÚZK, Zeměměřický úřad obchodní e-portál ČÚZK	100 %	2006 -2012	ISO19115 2003/Cor.1:2006 , INSPIRE
DMR-4G	TXT	5 m	0,3 m odkrytý terén, 1 m zalesněný terén	5 x 5 m	ČÚZK, Zeměměřický úřad obchodní e-portál ČÚZK (dokončení na konci roku 2013)	67,9 %	2009-2013	ISO19115 2003/Cor.1:2006 , INSPIRE
DMR-5G	TXT	Méně než 5m	0,18 odkrytý terén, 0,3 m zalesněný terén	nepravidelná síť	ČÚZK, Zeměměřický úřad obchodní e-portál ČÚZK (dokončení na konci roku 2015)	33,4 %	2009-2015	ISO19115 2003/Cor.1:2006 , INSPIRE
DMÚ 25 (DMR2,5)	SHP	5 – 20 m	3 – 15 m	-	VGHMÚř Dobruška CENIA – Česká informační agentura životního prostředí	100 %	1994-2000(1998)	-
SRTM3	Rastr (16bit)	max. 15m, (+- 20 m)	max. 12 m (+-16 m)	111 x 111 m (na rovníku)	Volně stažitelný, např. přes ArcData	100 %	2000	-
GTOPO30 (GTED)	rastr	270m +- 30m	95 m +- 30 m	900 x 900 m (na rovníku)	Volně stažitelný	100 %	1996	-

Příloha 3. Digitální modely terénu pokrývající území České republiky

Datová sada	Typ dat	Polohová přesnost	Výšková přesnost	Prostorové rozlišení	Dostupnost	Pokrytí území ČR	Rok aktualizace (časová přesnost)	Standardy kvality / Metadata
GMTED2010	rastr	26 - 30 m	max. 6 m	225 x 225 m (na rovníku)	Volně stažitelný	100 %	2010	-
Aster GDEM	Rastr (GeoTIFF (16bit))	+ - 30 m	+ - 20 m	30 x 30 m (na rovníku)	Volně stažitelný	100 %	2009	-
SPOT 3D	GeoTIFF (16bit) / DTED2 / BIL (16bit)	15-30 m	10-20 m	20 x 20 m	Spot Image	100 %	2010	-
MONA PRO	Grid ASCII / Grid Arc-Info / X,Y,Z ASCII / TIFF / BIL / BMP /IMG	+ - 100 m	5m v rovinatém území, 10m v kopcovitém území, 20m v horském území	75 x 75 m	Geosys	100 %	-	-
DTM T-Mapy	ArcInfo coverage či ESRI shapefile, ArcInfo GRID či ve tvaru ASCII	-	5 – 20 m	40 x 40 m	T-Mapy	100 %	-	-
DTM Geodis	libovolné	-	+ -1 m	10 x 10 m	Geodis	100 %	průběžně	-

Zdroj: jednotlivé datové zdroje - ArcData (2013a), CUZK (2013, 2010), Geodis (2013), GISAT (2013), T-mapy (2012), USGS(2013) + úpravy a šetření autora

Příloha 4. Mapa oblasti terénního měření včetně typu povrchu jednotlivých PK



CESTNÍ SÍŤ okolí Jílové u Prahy

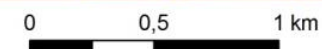
- Trasa 1
- Trasa 2
- Trasa 3
- Trasa 4
- Trasa 5

Typ povrchu

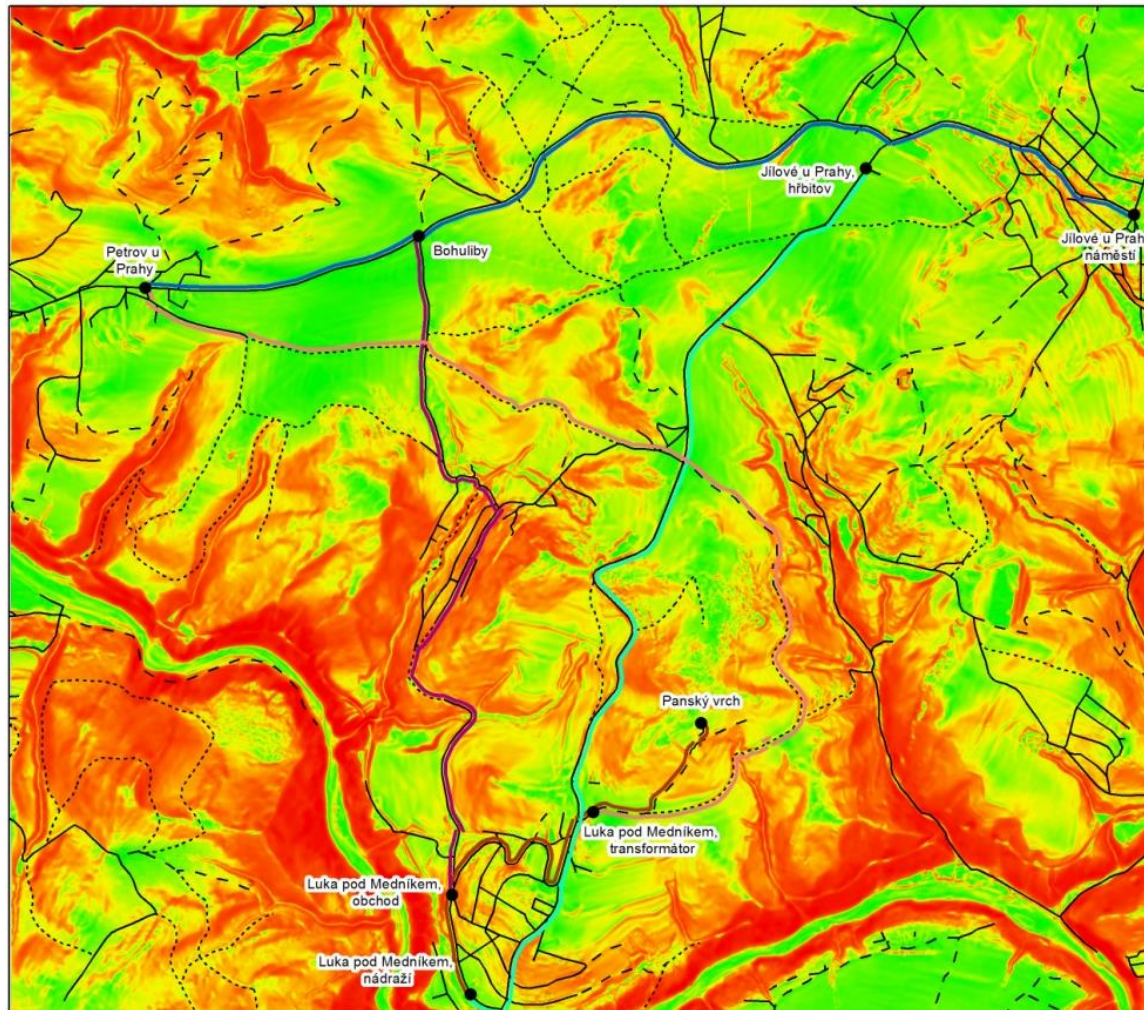
- zpevněný (asfalt, beton, dlažba)
- - - poškozený zpevněný
- - - štěrk, štěrkopísek
- neudržovaný (lesní a polní cesty)
- destinace

nadmořská výška [m n.m.]

- Max. : 452,0
- Min. : 199,9



Příloha 5. Trasy měření a sklonitost území



TRASY MĚŘENÍ okolí Jílové u Prahy

- Trasa 1
- Trasa 2
- Trasa 3
- Trasa 4
- Trasa 5

Typ povrchu

- zpevněný (asfalt, beton, dlažba)
- - - poškozený zpevněný
- - - štěrk, štěrkopísek
- neudržovaný (lesní a poľní cesty)

- Destinace

sklon [%]

- Max. : 224,5
Min. : 0,005



0 0,5 1 km

Příloha 6. Hodnocení cyklistických dostupnostních modelů

Model ²⁹	Směr	Lineární s křivostí	Lineární	Exponenciální	Kvadratický	Tázlar (2012)	Kosarová (2003)	Mapy.cz	Mapy.idnes.cz	Reálná měření (Ø 2)
Trasa 1 (zpevněná-extr. kopcovitá)	Luka pod Medníkem, nádraží → Panský vrch	12:35	12:16	12:28	15:13	14:14	12:32	8:00*	8:04	15:20
	Panský vrch → Luka pod Medníkem, nádraží	5:43	5:22	5:32	5:26	6:20	4:27	8:00*	8:04	4:56
Trasa 2 (zpevněná-kopcovitá)	Luka pod Medníkem, nádraží → Jílové u Prahy, hřbitov	31:46	31:04	19:25	34:48	22:29	19:34	14:00	13:35	22:42**
	Jílové u Prahy, hřbitov → Luka pod Medníkem, nádraží	9:35	9:21	10:05	9:20	12:12	9:53	14:00	13:35	8:44
Trasa 3 (nezpevněná-kopcovitá)	Luka pod Medníkem, obchod → Bohuliby	19:57	19:23	15:02	21:12	9:50	14:42	12:00** *	12:07**	15:41
	Bohuliby → Luka pod Medníkem, obchod	14:12	14:03	9:02	14:01	18:00	8:34	12:00** *	12:07**	9:26
Trasa 4 (nezpevněná-mírně kopcovitá)	Luka pod Medníkem, transformátor → Petrov u Prahy	18:00	18:00	19:08	17:55	23:08	15:52	****	****	19:07
	Petrov u Prahy → Luka pod Medníkem, transformátor	19:37	19:29	19:42	19:41	13:53	16:09	****	****	19:44
Trasa 5 (zpevněná-mírně kopcovitá)	Petrov u Prahy → Jílové u Prahy, náměstí	13:43	13:37	15:34	13:32	21:07	16:09	15:00	14:32	15:22
	Jílové u Prahy, náměstí → Petrov u Prahy	12:31	12:16	13:42	12:13	13:27	13:46	15:00	14:32	13:07
Celková časová nepřesnost	-	25:58	24:46	9:59	27:24	36:33	17:41	32:52	32:52	-
Průměrná časová chyba	-	18,01 %	17,18 %	6,93 %	19,01 %	25,36 %	12,27 %	31,21 %	31,21 %	-
Body	-	1	4	12	5	5	3	1	0	-

*k nejbližšímu routovatelnému místu, **potenciální vliv únavy, ***po červené turistické, ****neroutovatelná trasa

Zdroj: výzkum autora

²⁹s využitím velikosti parametru $\Delta h_p = 5$ m

Příloha 7. Hodnocení SW řešení výpočtových metod sklonu s využitím exp. modelu

Model*	Směr	Bez rozdělení linií s absolutní hodnotou sklonu (Hudeček, 2009)	Zonal Statistics as Table (Louthan, 2010)	Add Surface Information (bez rozdělení linií)	ČSN 71 63 01 s váženým průměrem (bez rozdělování linií – $\Delta h_p = \infty$)	Vážený průměr s parametrem $\Delta h_p = 10$ m	Vážený průměr s parametrem $\Delta h_p = 5$ m	Vážený průměr s parametrem $\Delta h_p = 2,5$ m	Reálná měření ($\varnothing 2$)
Trasa 1 (zpevněná-extr. kopcovitá)	Luka pod Medníkem, nádraží → Panský vrch	9:41	73:26	19:21	12:26	12:11	12:28	15:46	15:20
	Panský vrch → Luka pod Medníkem, nádraží	9:41	73:26	19:21	5:41	5:26	5:32	6:07	4:56
Trasa 2 (zpevněná-kopcovitá)	Luka pod Medníkem, nádraží → Jílové u Prahy, hřbitov	19:23	85:17	32:53	17:53	19:13	19:25	22:58	22:42
	Jílové u Prahy, hřbitov → Luka pod Medníkem, nádraží	19:23	85:17	32:53	10:56	10:55	10:05	12:19	8:44
Trasa 3 (nezpevněná-kopcovitá)	Luka pod Medníkem, obchod → Bohuliby	13:44	311:42	27:22	13:41	14:25	15:02	17:24	15:41
	Bohuliby → Luka pod Medníkem, obchod	13:44	311:42	27:22	8:06	9:02	9:02	11:21	9:26
Trasa 4 (nezpevněná-mírně kopcovitá)	Luka pod Medníkem, transformátor → Petrov u Prahy	22:16	42:55	30:25	19:31	19:34	19:08	19:44	19:07
	Petrov u Prahy → Luka pod Medníkem, transformátor	22:16	42:55	30:25	19:51	19:56	19:42	19:58	19:44
Trasa 5 (zpevněná-mírně kopcovitá)	Petrov u Prahy → Jílové u Prahy, náměstí	16:40	11:07	25:07	15:02	15:21	15:34	15:26	15:22
	Jílové u Prahy, náměstí → Petrov u Prahy	16:40	11:07	25:07	13:13	13:31	13:42	13:38	13:07
Celková časová nepřesnost	-	41:09	917:15	126:07	14:57	12:03	9:59	10:32	-
Celková časová chyba	-	28,55 %	636,32 %	87,49 %	10,37 %	8,36 %	6,93 %	7,31 %	-
Body	-	0	0	0	4	8	13	4	-

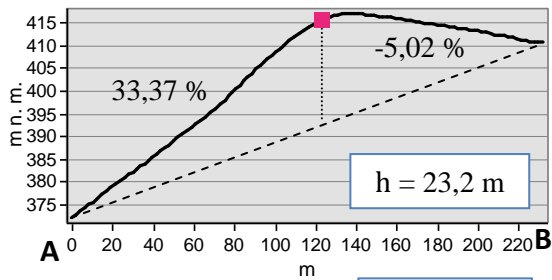
* Využity byly obě převodní funkce pro nezpevněné i zpevněné komunikace

Zdroj: výzkum autora

Příloha 8. Výškové grafy pro jednotlivé geomorfologické útvary

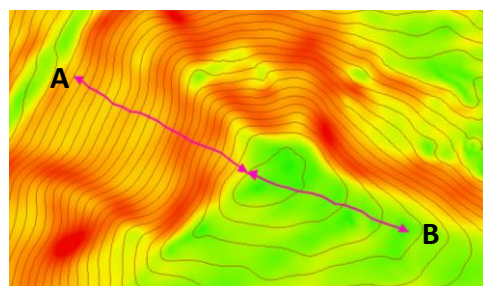
Výškový profil linií zachycující typické geomorfologické tvary modelovanými různými hodnotami křivosti, spojnice poč. a konc. bodu, výšková vzdálenost (h) a hodnota vert. křivosti linie (K), včetně sklonu nově rozdělených částí:

Geometrie a vizualizace linie v kritickém bodě, topografický podklad vrstevnice (ZIV = 2 m), rastr sklonu (červená – nejvyšší hodnoty, zelená nejnižší) a prahová testovací hodnota detekce prvního kritického bodu (Δh_p):

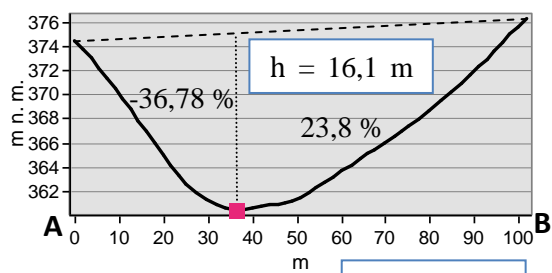


Geomorfologický tvar - kužel

$K = 0,79 \%$

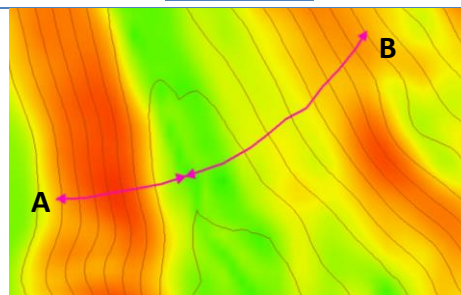


$\Delta h_p = 15 \text{ m}$

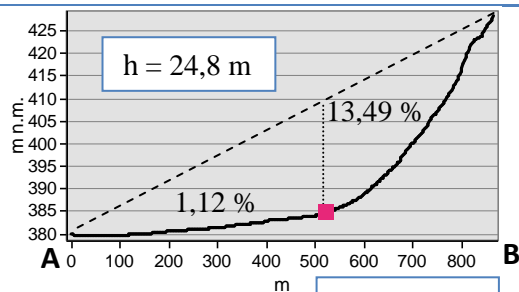


Geometrický tvar - údolí

$K = -6,47 \%$

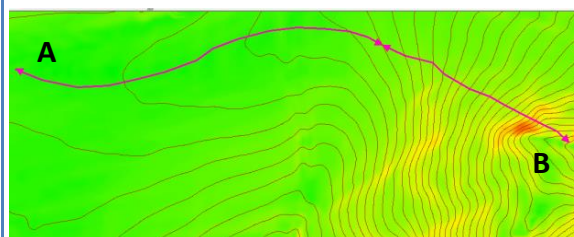


$\Delta h_p = 15 \text{ m}$

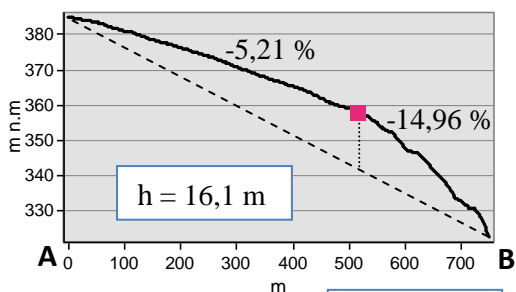


Geomorfologický tvar - část úvalu

$K = -0,72 \%$

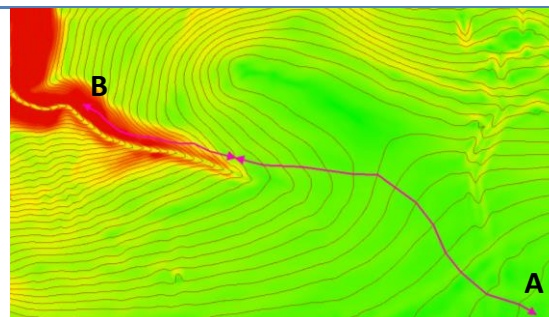


$\Delta h_p = 15 \text{ m}$

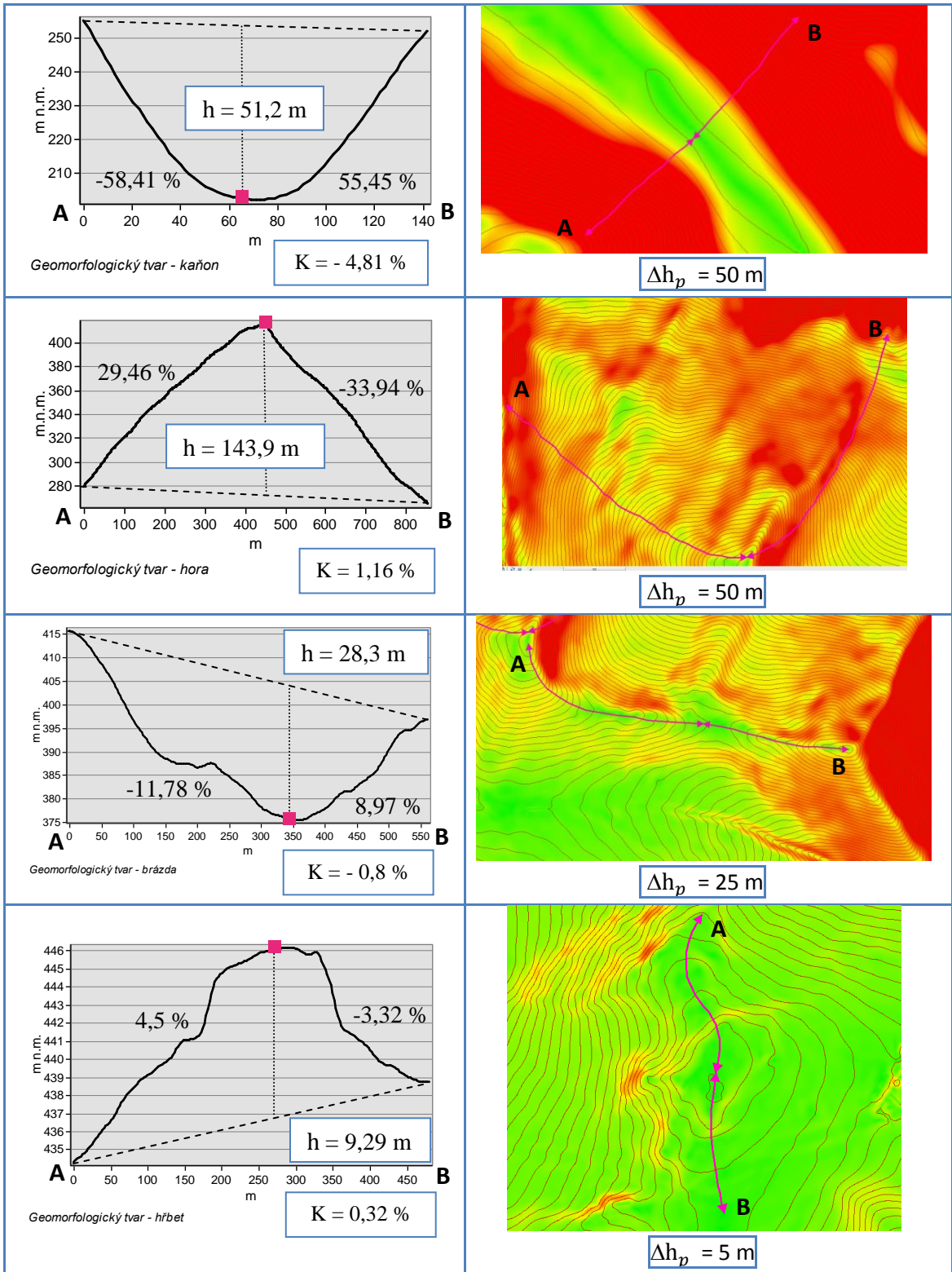


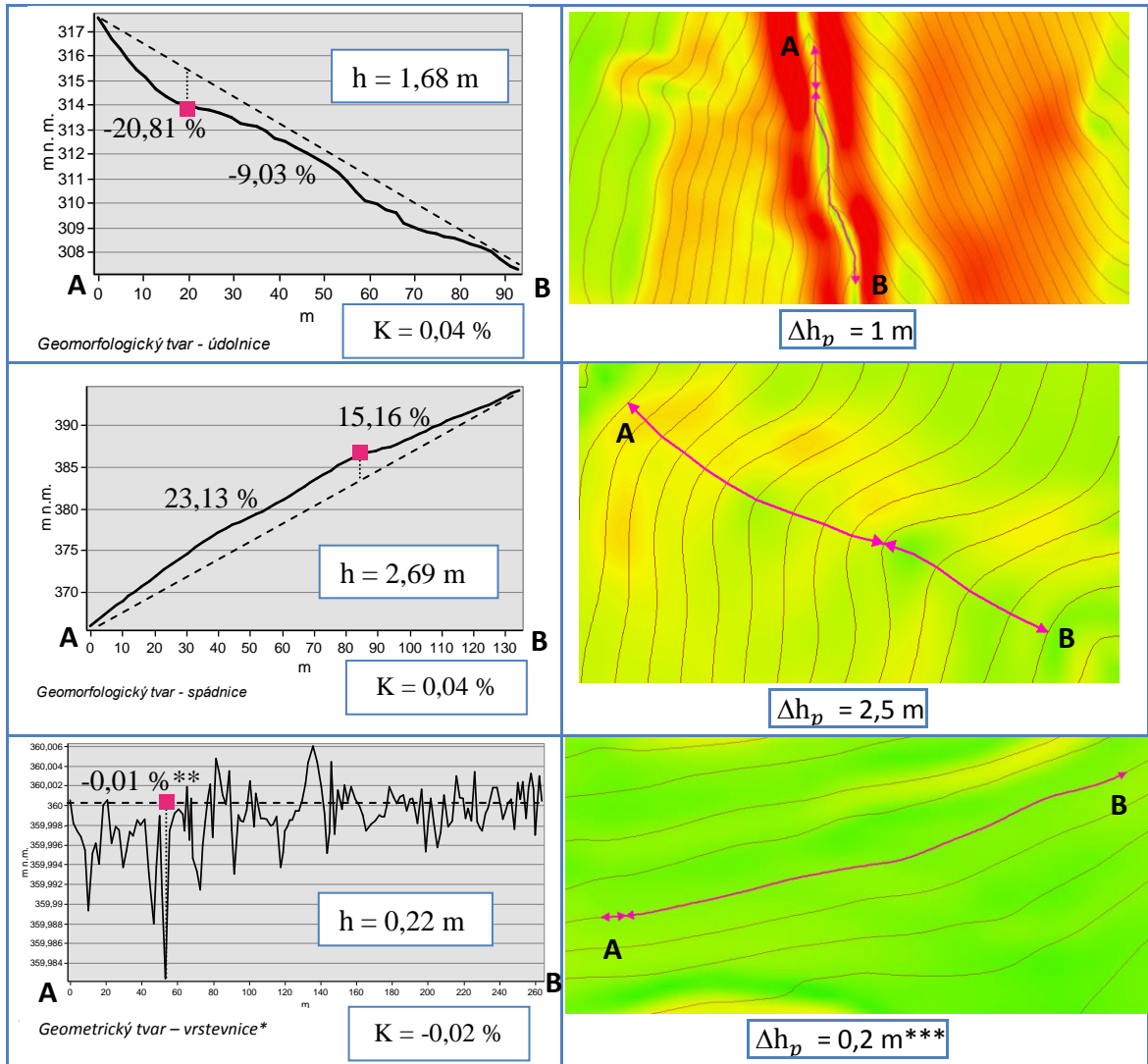
Geomorfologický útvar - úpatnice

$K = 1,09 \%$



$\Delta h_p = 15 \text{ m}$





*pro tvorbu vrstevnice bylo využito editační funkce Trace

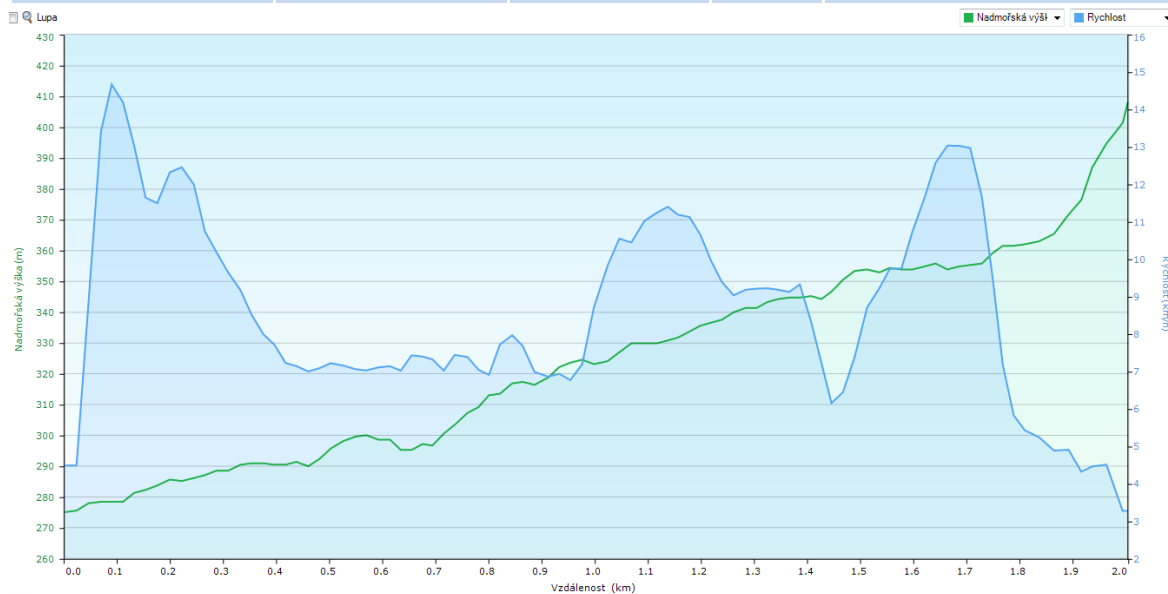
**celková hodnota sklonu za celou linii

***při zadání hodnoty na 0,1 m byl v prvním cyklu detekován zobrazený bod, pro něj je platná hodnota h . Celkově ale proběhlo cyklů 17 a nebylo možné přesně určit jeden kritický bod. Algoritmus musel být ukončen hned po prvním cyklu.

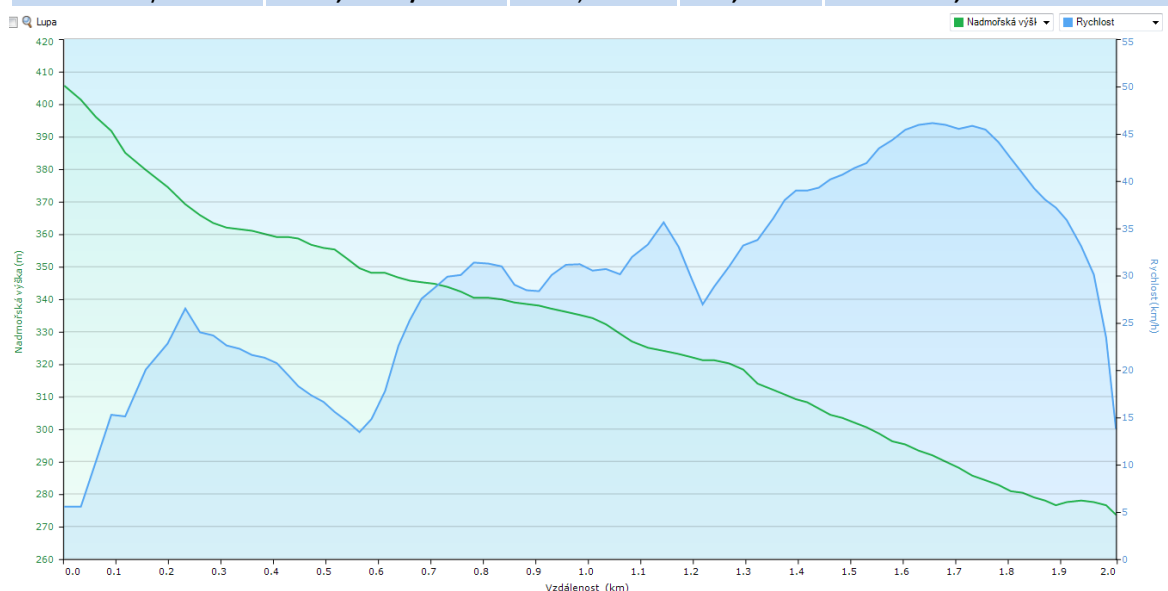
Zdroj: výzkum autora

Příloha 9. Trasa 1, kombinovaná (převážně zpevněná)

Vzdálenost 2 km* (po povrchu 2309 m)		Index zpevněnosti: 1,29		
Směr: Luka pod Medníkem, nádraží → Panský vrch		Celkový čas: 4 min 56 sec		
Průměrná rychlost		Průměrný sklon		Průměrná křivost
8 km/h*	11,11 km/h**	6,6 %*	5,32 %	0,3909337**



Celkové převýšení / Relativní výšková členitost	Celkové stoupání / na vzdálenosti	Celkové klesání / na vzdálenosti
144 m* / 6, 23 %	138 m* / 2055 m	6 m* / 254 m
Směr: Panský vrch → Luka pod Medníkem, nádraží		Celkový čas: 15 min 20 sec
Průměrná rychlost		Průměrný sklon
27 km/h*	25,03 km/h**	-6,6 %*
		Průměrná křivost
		0,3909337

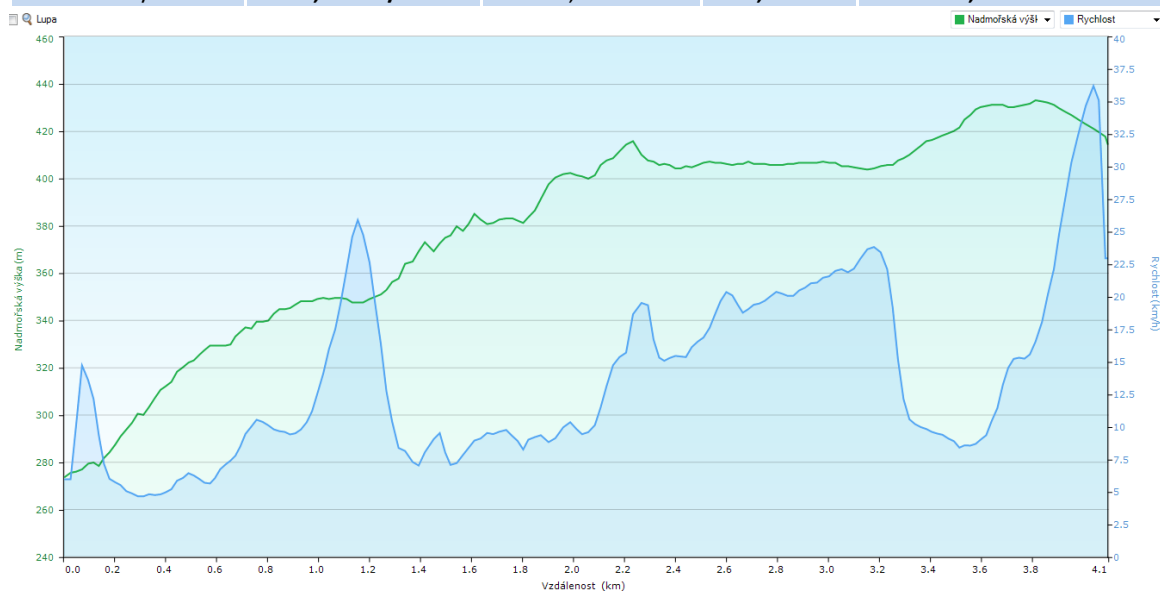


Celkové převýšení / Relativní výšková členitost	Celkové stoupání / na vzdálenosti	Celkové klesání / na vzdálenosti
133 m* / 5, 76 %	1 m* / 254 m	132 m* / 2055 m

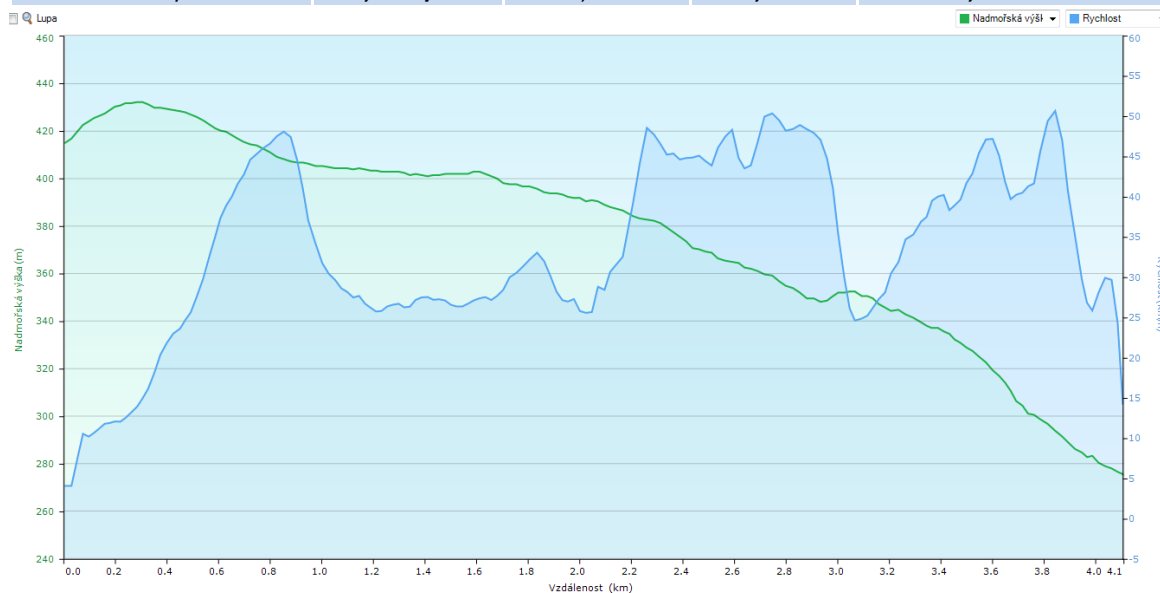
* výpočet programu BaseCamp, **s využitím exponenciální trendu a parametru h = 5 (Zdroj: výzkum autora)

Příloha 10. Trasa 2, zpevněná (asfalt)

Vzdálenost 4,1 km* (po povrchu 4120 km)		Index zpevněnosti: 1	
Směr: Luka pod Medníkem, nádraží → Jílové u Prahy, hřbitov		Celkový čas: 22 min 42 sec	
Průměrná rychlost		Průměrný sklon	
11 km/h*	12,73 km/h**	3,4 %*	3,46 %
		Průměrná křivost	
		-0,20481217	



Celkové převýšení / Relativní výšková členitost	Celkové stoupání / na vzdálenosti	Celkové klesání / na vzdálenosti
229 m* / 5,56 %	185 m* / 3579 m	44 m* / 541 m
Směr: Jílové u Prahy, hřbitov → Luka pod Medníkem, nádraží		Celkový čas: 8 min 44 sec
Průměrná rychlost		Průměrný sklon
30 km/h*	24,3 km/h**	- 3,4 %*
		Průměrná křivost
		-0,20481217

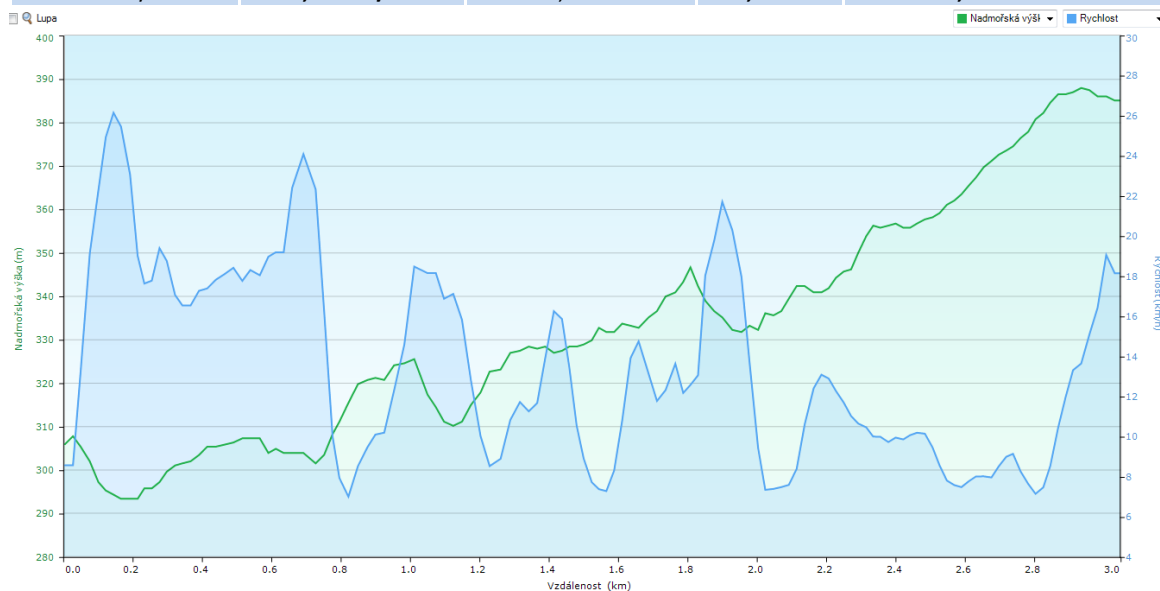


Celkové převýšení / Relativní výšková členitost	Celkové stoupání / na vzdálenosti	Celkové klesání / na vzdálenosti
185 m* / 4,49 %	23 m* / 541 m	162 m* / 3579 m

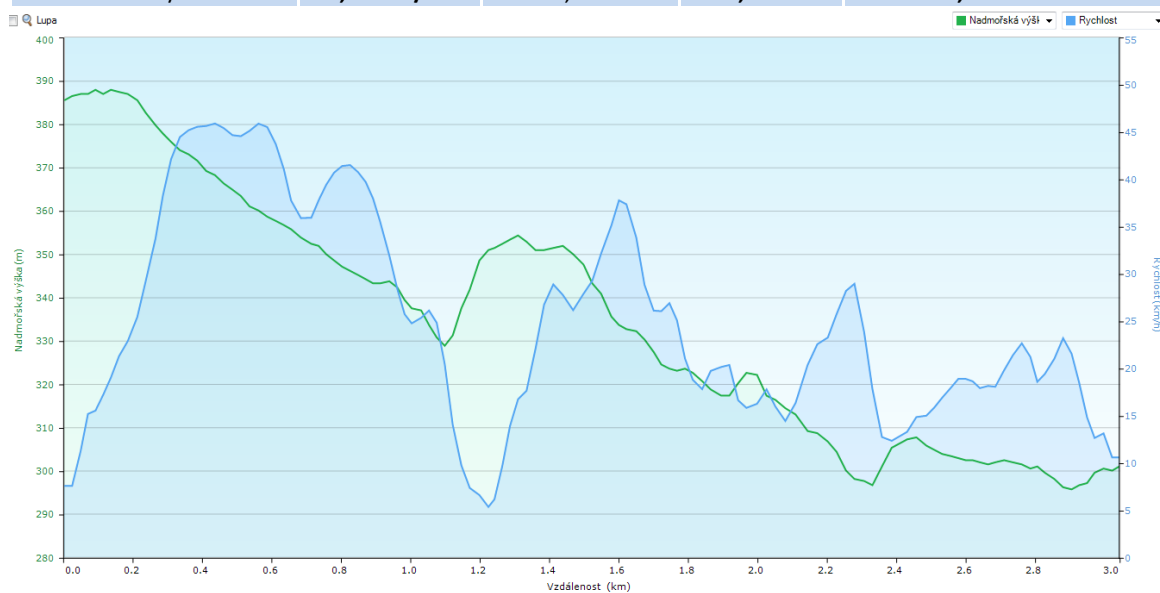
* výpočet programu BaseCamp, **s využitím exponenciální trendu a parametru h = 5 (Zdroj: výzkum autora)

Příloha 11. Trasa 3, kombinovaný

Vzdálenost 3,0 km* (po povrchu 3185 m)		Index zpevnění: 1,39		
Směr: Luka pod Medníkem, obchod → Bohuliby		Celkový čas: 15 min 41 sec		
Průměrná rychlost		Průměrný sklon		Průměrná křivost
12 km/h*	12,71 km/h**	2,6 %*	2,88 %	0,23205521



Celkové převýšení / Relativní výšková členitost	Celkové stoupání / na vzdálenosti	Celkové klesání / na vzdálenosti		
182 m* / 5,71 %	131 m* / 2626 m	51 m* / 559 m		
Směr: Bohuliby → Luka pod Medníkem, obchod		Celkový čas: 9 min 26 sec		
Průměrná rychlost		Průměrný sklon	Průměrná křivost	
20 km/h*	21,09 km/h**	- 2,8 %*	2,88 %	0,23205521

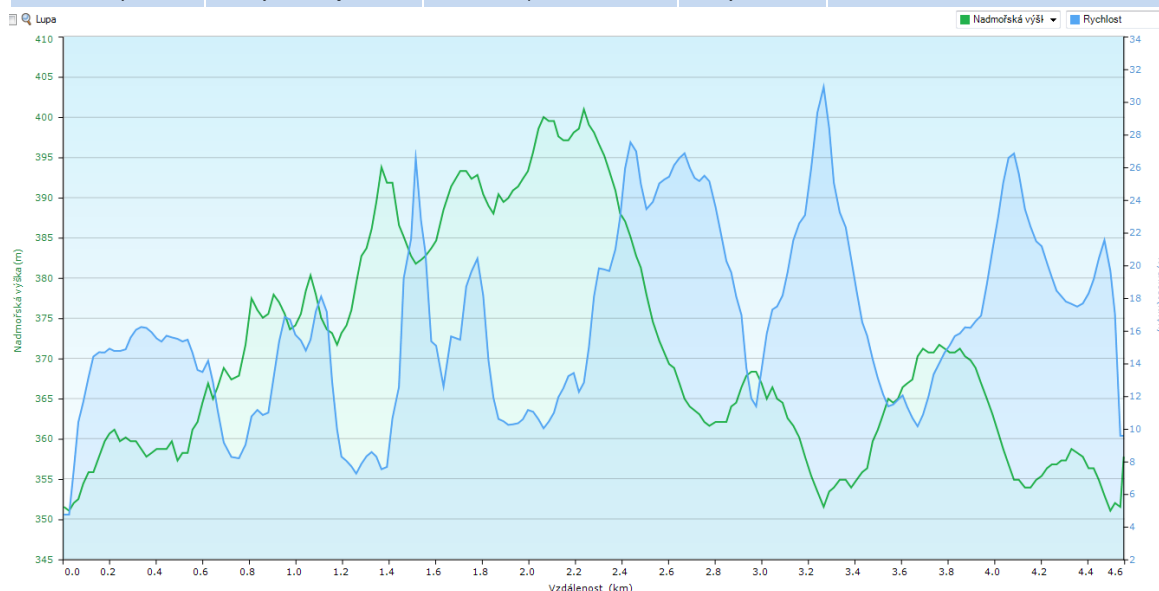


Celkové převýšení / Relativní výšková členitost	Celkové stoupání / na vzdálenosti	Celkové klesání / na vzdálenosti
189 m* / 5,93 %	47 m* / 559 m	132 m* / 2626 m

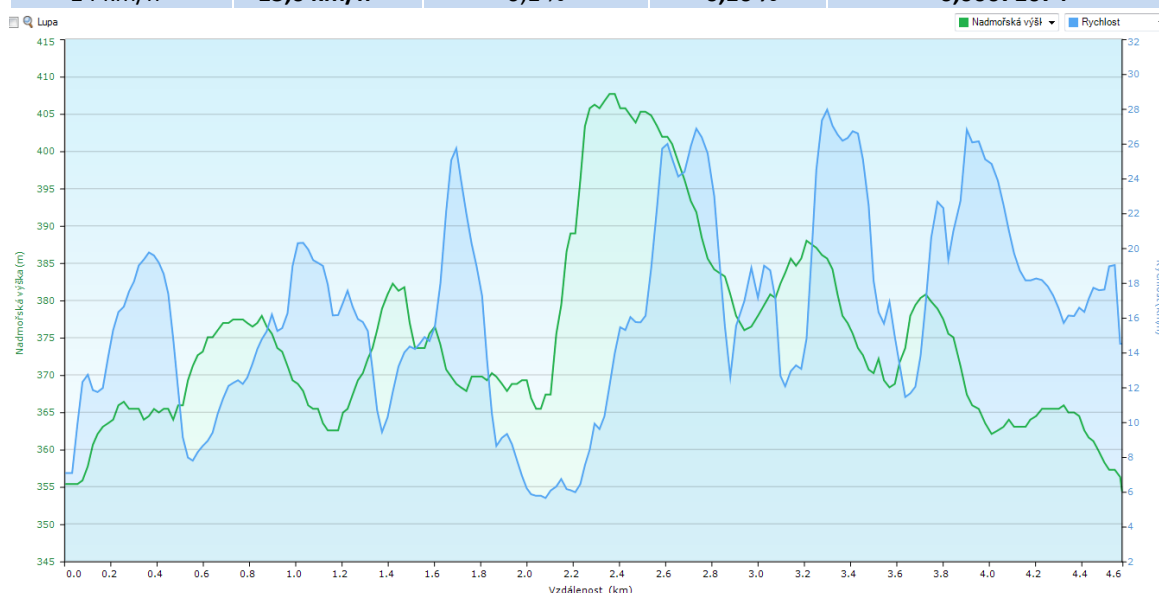
* výpočet programu BaseCamp, **s využitím exponenciální trendu a parametru h = 5 (Zdroj: výzkum autora)

Příloha 12. Trasa 4, nezpevněná

Vzdálenost 4,6 km* (po povrchu 4596 m)			Index zpevnění: 3,12	
Směr: Luka pod Medníkem, transformátor → Petrov u Prahy			Celkový čas: 19 min 07 sec	
Průměrná rychlost		Průměrný sklon		Průměrná křivost
15 km/h*	14,24 km/h**	0,1 %*	0,16 %	-0,00071074



Celkové převýšení / Relativní výšková členitost	Celkové stoupání /na vzdálenosti	Celkové klesání / na vzdálenosti		
234 m* / 5,09 %	120 m* / 2369 m	114 m* / 2226 m		
Směr: Petrov u Prahy → Luka pod Medníkem, transformátor		Celkový čas: 19 min 44 sec		
Průměrná rychlost		Průměrný sklon	Průměrná křivost	
14 km/h*	13,6 km/h**	- 0,1 %*	-0,16 %	-0,00071074

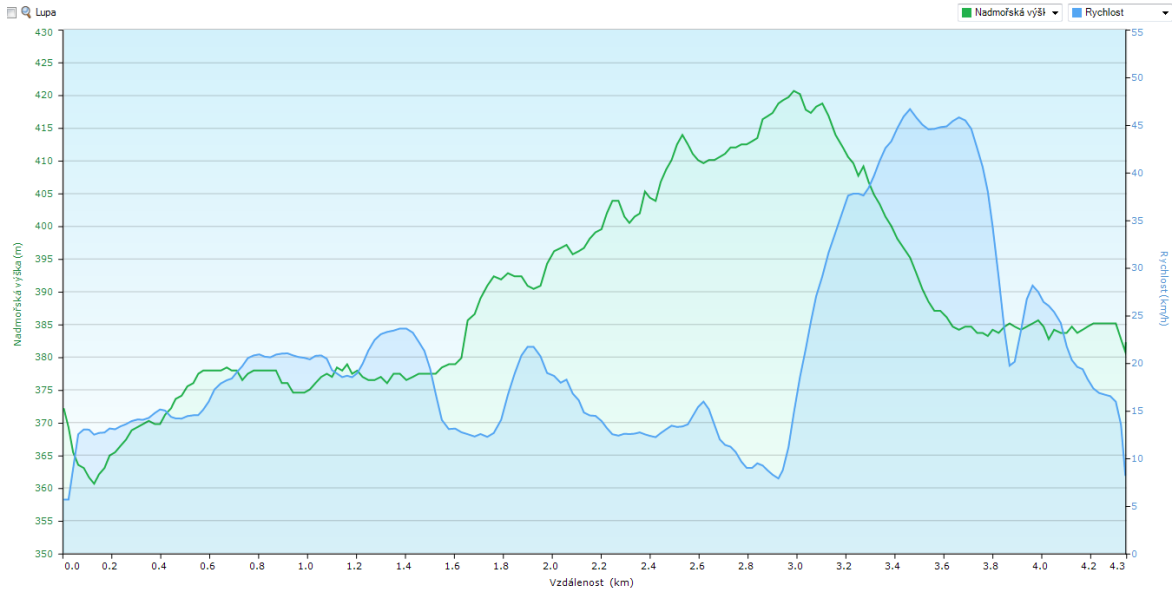


Celkové převýšení / Relativní výšková členitost	Celkové stoupání /na vzdálenosti	Celkové klesání / na vzdálenosti
243 m* / 5,29 %	121 m* / 2226 m	122 m* / 2369 m

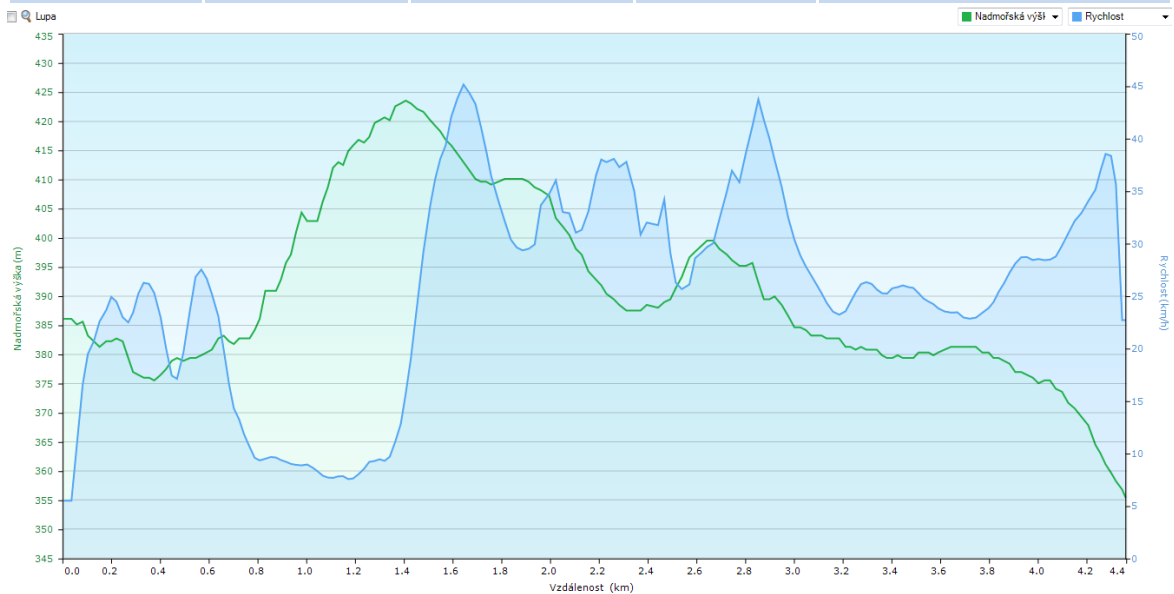
* výpočet programu BaseCamp, **s využitím exponenciální trendu a parametru h = 5 (Zdroj: výzkum autora)

Příloha 13. Trasa 5, zpevněná (asfalt)

Vzdálenost: 4,4 km* (po povrchu 4383 m)			Index zpevnění: 1	
Směr: Petrov u Prahy → Jílové u Prahy, náměstí			Celkový čas: 15 min 22 sec	
Průměrná rychlost		Průměrný sklon		Průměrná křivost
17 km/h*	16,53 km/h**	0,2 %*	0,71 %	-0,00071074



Celkové převýšení / Relativní výšková členitost	Celkové stoupání / na vzdálenosti	Celkové klesání / na vzdálenosti		
153 m* / 3,49 %	81 m* / 1345 m	72 m* / 3037 m		
Směr: Jílové u Prahy, náměstí → Petrov u Prahy		Celkový čas: 13 min 07 sec		
Průměrná rychlost		Průměrný sklon	Průměrná křivost	
21 km/h*	19,11 km/h**	- 0,7 %*	-0,71 %	-0,00071074



Celkové převýšení / Relativní výšková členitost	Celkové stoupání / na vzdálenosti	Celkové klesání / na vzdálenosti
160 m* / 3,65 %	65 m* / 3037 m	95 m* / 1345 m

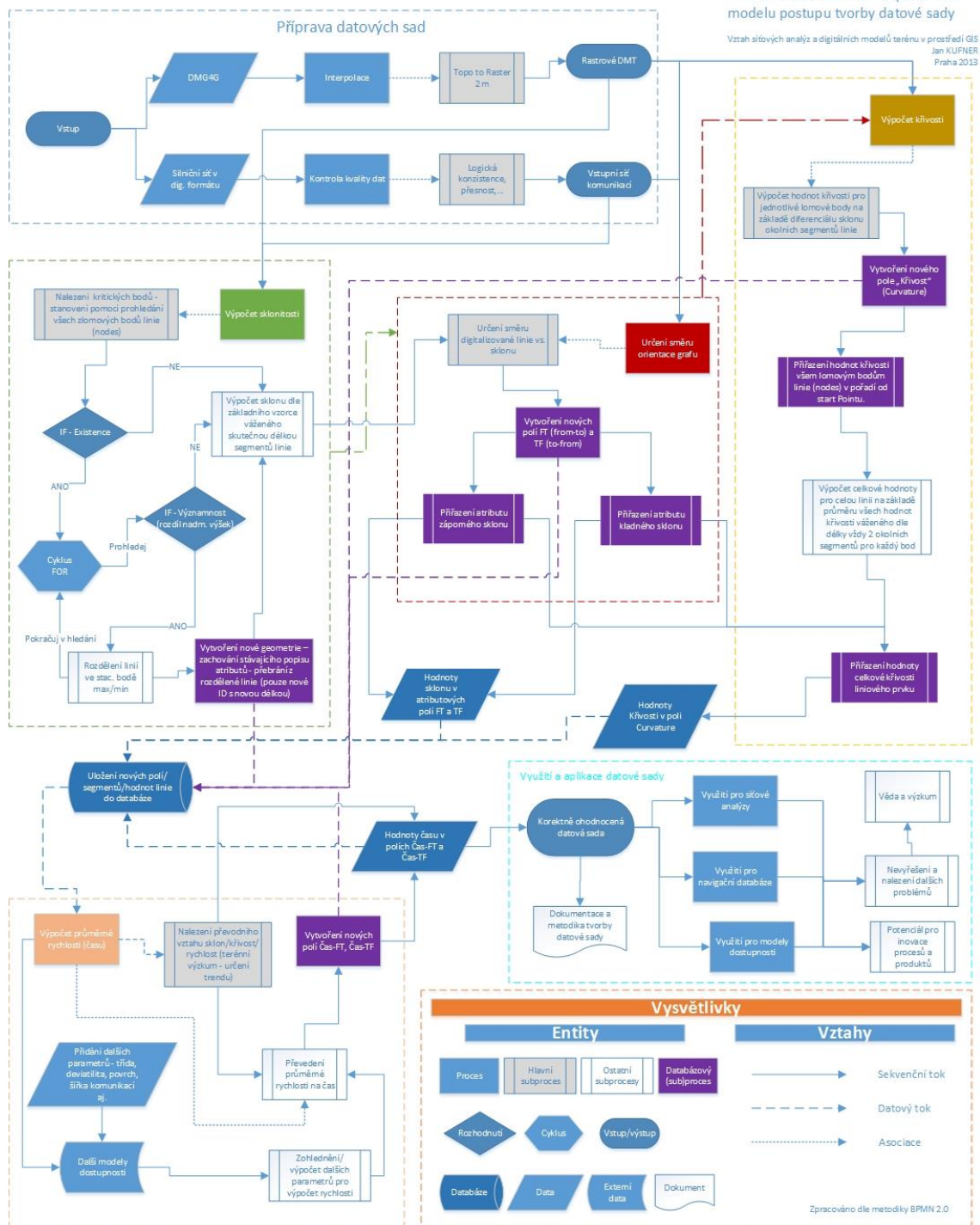
* výpočet programu BaseCamp, **s využitím exponenciální trendu a parametru h = 5 (Zdroj: výzkum autora)

Příloha 14. Matice rychlostí dostupnostních modelů [km/h]

Model		Lineární s křivostí																Exponenciální			
Typ povrchu	Křivost	Zpevněný								Nezpevněný								Zpev.	Nezp.		
		-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	-	-
Sklon	-20%	60	60	60	60	59	57	56	54	40	40	37	34	30	26	23	19	16	16	60	40
	-19%	60	60	60	58	57	55	54	52	40	40	37	33	29	26	22	18	15	15	60	39
	-18%	60	59	58	56	55	54	52	51	40	39	36	32	29	25	21	18	14	14	60	37
	-17%	59	58	56	55	53	52	50	49	40	39	35	31	28	24	21	17	13	13	60	35
	-16%	57	56	54	53	51	50	48	47	40	38	34	31	27	23	20	16	13	13	60	33
	-15%	55	54	52	51	50	48	47	45	40	37	34	30	26	23	19	15	12	12	60	32
	-14%	54	52	51	49	48	46	45	43	40	36	33	29	26	22	18	15	11	11	60	30
	-13%	52	50	49	47	46	44	43	42	39	36	32	28	25	21	18	14	10	10	60	28
	-12%	50	48	47	46	44	43	41	40	39	35	31	28	24	20	17	13	10	10	59	27
	-11%	48	47	45	44	42	41	39	38	38	34	31	27	23	20	16	12	9	9	54	25
	-10%	46	45	43	42	40	39	38	36	37	34	30	26	23	19	15	12	8	8	49	24
	-9%	44	43	42	40	39	37	36	34	36	33	29	25	22	18	15	11	7	7	44	23
	-8%	43	41	40	38	37	35	34	32	36	32	28	25	21	17	14	10	7	7	40	22
	-7%	41	39	38	36	35	34	32	31	35	31	28	24	20	17	13	9	6	6	37	21
	-6%	39	38	36	35	33	32	30	29	34	31	27	23	20	16	12	9	5	5	34	19
	-5%	37	36	34	33	31	30	28	27	33	30	26	23	19	15	12	8	4	4	31	18
	-4%	35	34	32	31	30	28	27	25	33	29	25	22	18	14	11	7	4	4	28	17
	-3%	34	32	31	29	28	26	25	23	32	28	25	21	17	14	10	6	3	3	25	17
	-2%	32	30	29	27	26	24	23	22	31	28	24	20	17	13	9	6	2	2	23	16
	-1%	30	29	27	26	24	23	21	20	30	27	23	20	16	12	9	5	1	1	21	15
	0%	28	27	25	24	22	21	19	18	30	26	22	19	15	12	8	4	1	1	19	14
	1%	26	25	23	22	21	19	18	16	29	25	22	18	14	11	7	3	1	1	17	13
	2%	25	23	22	20	19	17	16	14	28	25	21	17	14	10	6	3	1	1	16	13
	3%	23	21	20	18	17	15	14	12	27	24	20	17	13	9	6	2	1	1	14	12
	4%	21	19	18	17	15	14	12	11	27	23	19	16	12	9	5	1	1	1	13	11
	5%	19	18	16	15	13	12	10	9	26	22	19	15	11	8	4	1	1	1	12	11
	6%	17	16	14	13	11	10	9	7	25	22	18	14	11	7	3	1	1	1	11	10
	7%	15	14	13	11	10	8	7	5	24	21	17	14	10	6	3	1	1	1	10	10
	8%	14	12	11	9	8	6	5	3	24	20	16	13	9	6	2	1	1	1	9	9
	9%	12	10	9	7	6	5	3	2	23	19	16	12	8	5	1	1	1	1	8	9
	10%	10	9	7	6	4	3	1	1	22	19	15	11	8	4	1	1	1	1	8	8
	11%	8	7	5	4	2	1	1	1	21	18	14	11	7	3	1	1	1	1	7	8
12%	6	5	3	2	1	1	1	1	21	17	13	10	6	3	1	1	1	1	7	7	
13%	5	3	2	1	1	1	1	1	20	16	13	9	5	2	1	1	1	1	6	7	
14%	3	1	1	1	1	1	1	1	19	16	12	8	5	1	1	1	1	1	6	7	
15%	1	1	1	1	1	1	1	1	18	15	11	8	4	1	1	1	1	1	6	6	
16%	1	1	1	1	1	1	1	1	18	14	10	7	3	1	1	1	1	1	5	6	
17%	1	1	1	1	1	1	1	1	17	13	10	6	2	1	1	1	1	1	5	6	
18%	1	1	1	1	1	1	1	1	16	13	9	5	2	1	1	1	1	1	4	5	
19%	1	1	1	1	1	1	1	1	15	12	8	5	1	1	1	1	1	1	4	5	
20%	1	1	1	1	1	1	1	1	15	11	7	4	1	1	1	1	1	1	4	5	

Zdroj: výzkum autora

Příloha 15. Konceptuální model postupu tvorby korektně ohodnocené datové sady



30

Zdroj: výzkum autora, zpracováno dle metodiky BPMN 2.0³¹.

³⁰ Sekvenční tok vyjadřující následnost procesních prvků (entit). Datový tok popisuje zasílání dat. Entity: Proces obsahující zobecnění činností. Datový objekt popisující vstup nebo výstup objektů a datovými toky mezi nimi a perzistentní DB (Zdroj: Hrtoň, 2011).

³¹ Business Process Modeling Notation je modelovací jazyk (notace), pomocí něhož se navrhují, respektive modelují procesy, které prostřednictvím grafického záznamu ulehčují lidskou komunikaci mezi uživateli a technickými uživateli komplexních procesů (Zdroj: Hrtoň, 2011).