



Testování prvků kritické dopravní infrastruktury

Testování prvků kritické dopravní infrastruktury

Zpracovali:

Dr. Ing. Jan Podroužek

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební

Ing. Jan Gruber

Ministerstvo dopravy České republiky

Brno, 2019

Výsledek vznikl v rámci řešení projektu RESILIENCE 2015: Dynamické hodnocení odolnosti souvztažných subsystémů kritické infrastruktury, reg. č. VI20152019049, podpořeného Ministerstvem vnitra v rámci programu Bezpečnostního výzkumu České republiky 2015-2022.

OBSAH

1	Úvod.....	5
1.1	Motivace pro testování dopravní infrastruktury.....	5
1.2	Základní funkce dopravní infrastruktury.....	6
1.3	Indikátory odolnosti dopravní infrastruktury.....	7
1.3.1	Resilience.....	7
1.3.2	Robustnost.....	7
1.3.3	Redundance.....	8
2	Kritická dopravní infrastruktura	10
2.1	Legislativní rámec	11
2.2	Charakteristika prvků.....	12
2.3	Možnost vzniku krizového stavu.....	15
3	Modelování dopravní infrastruktury	17
3.1	Teorie grafů.....	17
3.2	Vlastnosti hran.....	22
3.3	Vlastnosti uzlů.....	23
4	Doporučený postup	26
4.1	Testování dopravní sítě jako celku.....	26
4.1.1	Detekce páteřní sítě: z $\forall A$ do $\forall B$	26
4.1.2	Analýza vzdáleností, cestovních časů a dalších vlastností sítě.....	27
4.1.3	Identifikace prostorových struktur	28
4.1.4	Resilience sítě dle Sudakov a Vu	29
4.2	Testování jednoho vybraného prvku	30
4.2.1	Detekce páteřní sítě: z A do $\forall B$	30
4.2.2	Analýza vzdáleností, cestovních časů a dalších vlastností sítě.....	30
4.2.3	Analýza širších vztahů.....	33
4.2.4	Kvantifikace následků při odebrání vybraného prvku.....	34
4.2.5	Využití existujícího projektu Urban Mobility Fingerprint.....	34
4.3	Testování dvojice prvků.....	35
4.3.1	Kvantifikace spolehlivostních charakteristik: z A do B	35
4.3.2	Charakteristika trasy	36
4.3.3	Využití existujícího projektu „Street DNA“	36
5	Seznam literatury a online zdrojů	38
6	Přílohy.....	40
6.1	Příloha 1: Představení softwarového nástroje netir 1.0.....	40

6.2	Příloha 2: Definice modelového příkladu	42
6.3	Příloha 3: Řešení modelového příkladu	45
6.4	Příloha 4: Presskit moovellab.com	46
6.5	Příloha 5: Úloha GIS při analýze dopravních sítí	48
6.5.1	Úvod do problematiky.....	48
6.5.2	Příklady analýz dopravních sítí.....	52
6.5.3	Detekce páteřní sítě	52
6.5.4	Vyhodnocení matice vzdáleností.....	54
6.5.5	Vyhodnocení obslužné oblasti.....	55
6.5.6	Použitá literatura	57

1 ÚVOD

Čtenáři se předkládá metodika testování prvků kritické dopravní infrastruktury. Silniční síť a její součásti jsou zde jednoduchými vazbami charakterizovány pomocí abstraktního modelu grafu, na jehož topologii následně probíhá řada simulací, které směřují k **analýze dynamických vazeb** v modelu sítě a **transformaci vstupních nejistot a vznikajících nejistot na výstupní nejistoty**.

Novost metodiky spočívá v umožnění **objektivního testování** a kvantifikaci řady **indikátorů odolnosti dopravní infrastruktury**, jejichž formulace se sice prezentují v odborné literatuře, ale v konkrétních případech jsou jen velmi obtížně vzájemně porovnatelné.

Podaří-li se nashromáždit dostatek relevantních vstupních dat, především pravděpodobnostních charakteristik hran (spojnic uzlů), bude možné zde prezentované doporučení uplatnit při debatě o optimálním návrhu provozu, údržbě, opravě či rekonstrukce silniční sítě, s uvážením ostatních kritických prvků infrastruktury ČR, včetně synchronizace výše uvedených akcí mezi jednotlivými správními celky. **Uživateli metodiky** jsou tak orgány státní správy a samosprávy, které odpovídají za návrh pozemních komunikací, jejich následnou údržbu a provoz a zejména řešení mimořádných situací.

1.1 MOTIVACE PRO TESTOVÁNÍ DOPRAVNÍ INFRASTRUKTURY

Česká republika je zemí s velmi vysokou hustotou sítě silnic a železnic. Na 1 km² připadá 0,7 km silnic a 0,12 km železnic. Každým rokem navíc dochází k nárůstu hustoty provozu na našich silnicích a dálnicích. Zcela logicky se tedy zvyšuje poptávka po systémovém řešení organizace a správy rostoucí mobility a zajištění bezpečnosti všech jejich účastníků. V rámci této metodiky se potom konkrétně jedná o následující motivující aspekty, které souvisí s požadavky na testování dopravní infrastruktury:

- **Objektivní přístup ke správě dopravní infrastruktury**, pomocí kterého je možno provádět strategické plánování údržby a opravy prvků dopravní infrastruktury. Za pomoci doplňujících informací z diagnostického průzkumu a se zohledněním aktuálních místních podmínek bude stanovován návrh údržby nebo opravy vybraných úseků PK, aby bylo možno určit dlouhodobé požadavky na údržbu silniční sítě, které by odpovídaly předdefinovaným úrovním služeb a tím určovaly rozpočtové požadavky. Viz např. aktuální výběrové řízení „Systém hospodaření s vozovkou pro potřeby ŘSD ČR“ („Oznámení o zahájení zadávacího řízení | Věstník veřejných zakázek,” n.d.) nebo již implementované systémy ve světě, jako např. BAUT či (PETSCHACHER, 2004) či InfraModex („Solutions Modex,” n.d.).
- **Nárůst rychlosti degradace stávající infrastruktury** vlivem omezené životnosti a její hromadné výstavby v minulosti, kdy nelze očekávat rovnoměrně rozdělené stárnutí, stejně jako dostatek finančních prostředků na včasnou obnovu a údržbu všech součástí dopravní infrastruktury. Jako příklad lze uvést situaci s mosty v ČR, kde 50 % všech mostů spadá do kategorie 4/uspokojivý až VII/havarijní (stav k 1. lednu 2016), zdroj („Silniční databanka a NDIC,” n.d.).

- S omezeným rozpočtem potom souvisí nutnost **optimalizace plánování oprav a rekonstrukcí**, kde jedním z hlavních kritérií by měla být především **hodnota priority** (kritičnosti) daného prvku infrastruktury, jejíž kvantifikace by měl a být založena na objektivních kritériích a v souladu s Národním programem ochrany kritické infrastruktury (odvětvová a průřezová kritéria týkající se kritické infrastruktury České republiky a případně vybraných subjektů evropské kritické infrastruktury), zdroj ("Národní program ochrany kritické infrastruktury (2010) | Databáze strategií - portál pro strategické řízení," n.d.).
- **Implementace technologických inovací** souvisejících s **průmyslem 4.0** ("Ministerstvo průmyslu a obchodu," n.d.), v počátcích prostřednictvím pilotních projektů, které by se měli realizovat v souladu s doporučeními Národního programu ochrany kritické infrastruktury, a jejichž výstupy budou nepochybně využitelné jako vstupní informace při testování prvků kritické infrastruktury. Jako příklad lze uvést projekt TISNET ("Traffic Infrastructure Sensor Network," n.d.), využívající (bezdrátové) sítě senzorů pro dopravní infrastrukturu za účelem dodání informací např. o poloze a rychlosti jednotlivých vozidel, jejímž cílem má být zlepšení managementu dopravní kongesce, udržování vozidla v jízdním pruhu a všeobecné zvýšení bezpečnosti při přechodu na autonomní vozidla prostřednictvím intenzivnější interakce mezi vozidly a dopravní infrastrukturou.

1.2 ZÁKLADNÍ FUNKCE DOPRAVNÍ INFRASTRUKTURY

Dopravní infrastruktura je integrální součástí územního plánování s významnou, ale nikoliv dominantní funkcí. Musí být v souladu s cíli územního plánování a v rámci svých technických možností musí být v souladu s principy udržitelného rozvoje území. Nároky na uspořádání dopravní infrastruktury mohou být (a obvykle jsou) protichůdné. Má mít komplexní kvalitu – poskytovat maximální výkon, rychlost, pohodlí, ale při minimálních nárocích na energii a prostor a bez negativního vlivu na životní prostředí. Převzato z ("Ústav územního rozvoje -," n.d.).

Mezi veřejnou infrastrukturou má dopravní infrastruktura, tj. dopravní cesty, dopravní zařízení a dopravní prostředky, významnou roli. Má značné nároky prostorové i investiční, včetně vyhraněných potřeb na specifické umístění dopravních cest i zařízení. Přes tento mimořádný význam je doprava především službou. Proto nemůže nadměrně nárokovat prostor, území i lokalizaci a nemůže nepřiměřeně ovlivňovat životní prostředí, naopak musí se potřebám a cílům územního plánování i ochrany životního prostředí v nejvyšší možné míře podřídit. Ono podřízení může být objektivně omezeno legitimními požadavky na nezbytné technické parametry, ale s jasně stanovenými mezemi. Převzato z ("Ústav územního rozvoje -," n.d.)

Mezi základní funkce dopravní infrastruktury (ideálně) patří:

- zajištění bezpečnosti všech účastníků dopravy,
- tvorba a ochrana krajiny a veřejných prostorů,
- služba pro rozvoj území,
- zabezpečení všech nároků na přepravu,
- podpora při plnění strategických, bezpečnostních a obranných cílů v souladu s Národním programem ochrany kritické infrastruktury,

- obrana země.

1.3 INDIKÁTORY ODOLNOSTI DOPRAVNÍ INFRASTRUKTURY

Odolnost dopravní infrastruktury (DoI) je ukazatel, který vypovídá o schopnosti zajistit fungování systému/prvku v podmínkách působení vnějších i vnitřních činitelů. Odolný prvek zajišťuje svoji cílovou funkci i v podmínkách, které na něj působí destruktivně (Richter & Kovářík, 2012). Odolnost DoI je schopnost odolávat naplněným hrozbám při udržení své funkčnosti, o obecně poté na schopnosti redukovat rozsah (závažnost) anebo dobu trvání destruktivní události. Efektivita/účinnost DoI spočívá v jejich schopnostech anticipovat, absorbovat, adaptovat se anebo ve schopnosti rychlé obnovy z potenciální destruktivní události.

Mezi konkrétní indikátory odolnosti dopravní infrastruktury, které lze objektivním způsobem kvantifikovat, lze zařadit tyto pojmy:

- resilience,
- robustnost,
- redundance.

Vzhledem k tomu, že existuje celá řada výkladů těchto termínů, je nutné se omezit na následující definice (Ghosn et al., 2014; Podroužek, Strauss, & Bergmeister, 2014):

1.3.1 Resilience

Z latinského *resiliere*. Je zde chápána na síťové úrovni a v souvislosti se schopností DoI poskytovat službu S , která může být nepříznivou událostí redukována, a schopností se v čase t s touto nepříznivou událostí vypořádat, tj. obnovit svou kapacitu na původní hodnotu (100% služby).

Kvantifikace resilience, Re , v tomto případě odpovídá akumulovanému omezení služby S , S_r , v čase t od počátku nepříznivé události t_e až po odstranění následků nepříznivé události t_f . Onou nepříznivou událostí může být i dopravní omezení vyplývající ze sesuvu půdy, rekonstrukce části vozovky, uzavírka mostu, atp.

$$Re = \int_{t_e}^{t_f} S_R(t) dt \quad (1)$$

1.3.2 Robustnost

Z latinského *robustus*. Jde o schopnost zajišťovat služby DoI bez významného omezení i za nepříznivého působení neočekávaných událostí. Kvantifikace využívá pravděpodobnostních charakteristik jednotlivých hran i uzlů a celého systému (na základě opakovaných simulací na modelu grafu):

$$RI = \frac{P_{f \text{ damaged}} - P_{f \text{ intact}}}{P_{f \text{ intact}}} \quad (2)$$

kde, $P_{f \text{ damaged}}$ je pravděpodobnost ztráty funkčnosti poškozeného (oslabeného) prvku (např. dopravní omezení vlivem opravy krytu vozovky) a $P_{f \text{ intact}}$ je pravděpodobnost ztráty funkčnosti původního (neoslabeného) systému.

1.3.3 Redundance

Z latinského *redundare*. Jde o kapacitu DoI redistribuovat (dopravní) zatížení v případě ztráty funkčnosti jednoho či více prvků, jedná se tedy o jakousi rezervu kapacity pro případ mimořádné události.

Kvantifikace redundance je možná na základě následujících vztahů:

$$R_u = LF_u / LF_1 \quad (3)$$

$$R_f = LF_f / LF_1 \quad (4)$$

$$R_d = LF_d / LF_1 \quad (5)$$

kde: LF_1 je zatížení (např. hustota dopravy), které způsobí ztrátu funkčnosti prvního prvku, LF_u je zatížení, které způsobí ztrátu funkčnosti (např. dopravní kolaps) celého systému, LF_f je zatížení, které způsobí, že dosud funkční systém přestane plnit návrhovou funkci (např. dojde k poklesu návrhové rychlosti) a LF_d je zatížení, které způsobí ztrátu funkčnosti celého systému, který přišel o jeden z hlavních prvků.

V případě, že jsou k dispozici pravděpodobnostní charakteristiky systému, lze redundanci vyjádřit pomocí faktoru redundance s pomocí spolehlivostních indexů β (Benjamin & Cornell, 2014):

$$\beta_R = \frac{\beta_{\text{intact}}}{\beta_{\text{intact}} - \beta_{\text{damaged}}} \quad (6)$$

kde β_{intact} je spolehlivostní index provozuschopného DoI a β_{damaged} je spolehlivostní index KDI s omezenou funkcí. Kvantifikace spolehlivostních indexů β je založena na pravděpodobnostních charakteristikách jednotlivých hran i uzlů a celého systému (na základě opakovaných simulací na modelu grafu).

Před samotnou aplikací těchto indikátorů je ale nutné zodpovědět řadu souvisejících otázek, jako např.:

- Jaké by měly být konkrétní limitní hodnoty těchto indikátorů?
- Mohou se tyto hodnoty měnit v čase?
- Jaké jsou jejich vzájemné závislosti?
- Je možné je nahradit jediným indikátorem?

Vzhledem k tomu, že na tyto otázky existuje řada odpovědí a konsensus je stále otevřený, bude nutné v počátcích využít zkušeností z literatury a zahraničních pracovišť.

2 KRITICKÁ DOPRAVNÍ INFRASTRUKTURA

Kritická infrastruktura poskytuje základní funkce a služby, které podporují společenské, ekonomické a environmentální systémy. Vzhledem k probíhajícím změnám klimatu a souvisejícím živelným pohromám, jejichž intenzita a frekvence se zvyšuje, a antropogenním mimořádným událostem, je nezbytné zajistit odolnost kritické infrastruktury tak, aby byla schopna odolávat, přizpůsobovat se a obnovovat se po nežádoucích událostech.

Tato metodika staví na řadě doporučení, publikací i výsledků mezinárodních projektů, mezi které patří:

- RESILENS: Realising European ReSilience for Critical Infrastructure ("European Commission : CORDIS : Projects and Results : RESILENS: Realising European ReSilience for Critical Infrastructure," n.d.),
- Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies (Rinaldi, Peerenboom, & Kelly, 2001),
- Critical Infrastructure Emergency Risk Management and Assurance Handbook (Australian Government, Emergency management, n.d.),
- Promoting Critical Infrastructure Protection by Emergency Managers and First Responders ("U.S. Fire Administration," n.d.),
- Základy řízení bezpečnosti kritické infrastruktury (Procházková, 2013),
- Transport network vulnerability: a method for diagnosis of critical locations in transport infrastructure systems (Taylor & D'Este, 2007).

Míra kritičnosti dopravní infrastruktury se dá vyjádřit pomocí celé řady faktorů, jak např. ve své publikaci *Bezpečnost kritické infrastruktury* shrnuje (Procházková, 2012):

- míra schopnosti ochrany,
- míra zranitelnosti vůči útoku,
- míra ohrožení zdraví a životů lidí,
- míra dopadu na životní prostředí,
- míra nákladnosti výměny či opravy,
- míra doby výměny či opravy,
- míra důležitosti pro zajišťování záchranných a nouzových funkcí v území,
- míra důležitosti pro zajišťování funkcí správy a samosprávy,
- míra důležitosti pro zajišťování funkcí armády a policie,
- míra redundance nebo substituční služby,
- míra důležitosti pro zajišťování komunikačních funkcí,
- míra dopadu selhání obslužnosti na ekonomiku regionu (státu); míra důležitosti provozuschopnosti,
- míra důležitosti v oblasti symbolické, kulturní apod.

Míra kritičnosti dopravní infrastruktury se dá rovněž vyjádřit ve vztahu k zajištění funkcí a obslužnosti prvků KI a zároveň jako míra vzájemných závislostí, včetně zohlednění nových trendů a vzájemných závislostí (kybernetická bezpečnost, CBRN, energetická bezpečnost, ICT atd.).

Moderní kritické infrastruktury stále více propojeny. Vzájemné závislosti jsou nejen v různých odvětvích, ale i napříč zeměmi. U klíčových zdrojů jsou dodavatelské řetězce velmi složité a globální, nastavené k výrobě „just in time“. Je rovněž třeba připomenout, že silniční síť je třeba hodnotit i z pohledu naplnění či nenaplnění určených kvót pro průřezová kritéria.

Výbor pro civilní nouzové plánování (CEPC) NATO identifikoval několik tzv. základních oblastí a požadavků pro zajištění civilní připravenosti, mezi které patří také schopnost efektivně zvládat nekontrolovaný pohyb obyvatelstva. V této oblasti je nezbytné analyzovat schopnosti (zejména evakuace a nouzového přežití) ve vztahu ke zvládání situace nekontrolovaného pohybu řádově stovek tisíc osob, kdy je analýza tras a možností, jak operativně řešit jejich uvolnění, klíčovým nástrojem. Typickým příkladem je situace, kdy stejnou část infrastruktury sdílí ozbrojené složky a IZS v kombinaci ozbrojeného konfliktu spojeného s migrační vlnou. Tehdy je třeba počítat i s uzavřením hranice a vznikem významných hrdel na vytipovaných hraničních přechodech, kde bude nutné zajistit současně pohyb ozbrojených složek i mezinárodních zdravotnických týmů apod.

2.1 LEGISLATIVNÍ RÁMEC

Systém určování prvků kritické infrastruktury a jejich ochrany je v České republice upraven zákonem č. 240/2000, o krizovém řízení (krizový zákon), ve znění pozdějších předpisů a příslušnými nařízeními vlády ČR. Tento krizový zákon zapracovává Směrnicí Rady 2008/114/ES ze dne 8. prosince 2008 o určování a označování evropských kritických infrastruktur a o posouzení potřeby zvýšit jejich ochranu, a dále definuje pojmy jako prvek kritické infrastruktury a subjekt kritické infrastruktury.

Zdroj: („240/2000 Sb. - o krizovém řízení a o změně některých zákonů (krizový zákon) - Text předpisu - Portál veřejné správy,” n.d.)

Prvkem kritické infrastruktury může být zejména stavba, zařízení, prostředek nebo veřejná infrastruktura. **Veřejnou infrastrukturou** mohou být např. dle stavebního zákona pozemky, stavby či zařízení. Mezi prvky veřejné infrastruktury patří (Richter & Kovářík, 2012):

- **dopravní infrastruktura**, například stavby pozemních komunikací, drah, vodních cest, letišť a s nimi souvisejících zařízení;
- **technická infrastruktura**, kterou jsou vedení a stavby a s nimi provozně související zařízení technického vybavení, například vodovody, vodojemy, kanalizace, čistírny odpadních vod, stavby a zařízení pro nakládání s odpady, trafostanice, energetické vedení, komunikační vedení veřejné komunikační sítě a elektronické komunikační zařízení veřejné komunikační sítě, produktovody;
- **občanské vybavení**, kterým jsou stavby, zařízení a pozemky sloužící například pro vzdělávání a výchovu, sociální služby a péči o rodiny, zdravotní služby, kulturu, veřejnou správu, ochranu obyvatelstva;
- **veřejné prostranství**, zřizované nebo užívané ve veřejném zájmu.

Pro účely krizového zákona se rozumí:

a) krizovým řízením souhrn řídicích činností orgánů krizového řízení zaměřených na analýzu a vyhodnocení bezpečnostních rizik a plánování, organizování, realizaci a kontrolu činností prováděných v souvislosti s

- přípravou na krizové situace a jejich řešením, nebo
- ochranou kritické infrastruktury,

b) krizovou situací mimořádná událost podle zákona o integrovaném záchranném systému²⁾, narušení kritické infrastruktury nebo jiné nebezpečí, při nichž je vyhlášen stav nebezpečí, nouzový stav nebo stav ohrožení státu (dále jen „krizový stav“),

c) krizovým opatřením organizační nebo technické opatření určené k řešení krizové situace a odstranění jejích následků, včetně opatření, jimiž se zasahuje do práv a povinností osob.

Ministerstvo dopravy v době krizového stavu je oprávněno uložit provozovateli dráhy, drážní dopravy, silniční dopravy, letadel, letišť, vnitrozemské vodní dopravy a veřejných přístavů, jakož i vlastníku a provozovateli ostatních objektů, zařízení a dopravních cest sloužících dopravě povinnosti k zabezpečování dopravních potřeb. Převzato z („240/2000 Sb. - o krizovém řízení a o změně některých zákonů (krizový zákon) - Text předpisu - Portál veřejné správy,” n.d., p. 20).

2.2 CHARAKTERISTIKA PRVKŮ

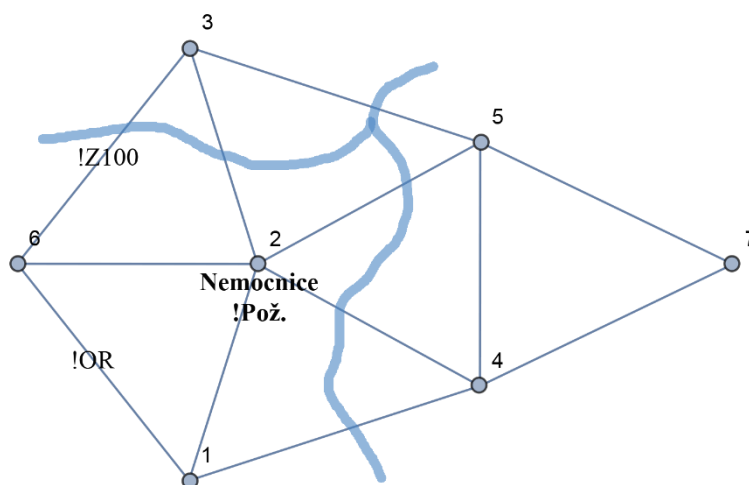
Pro potřeby této metodiky není rozhodující detailně pojednávat o jednotlivých prvcích kritické dopravní infrastruktury a jejich vzájemných vazbách, ale jde o systematické testování vybraných prvků na síťové úrovni.

Co se samotného výběru klíčových prvků v odvětví dopravy a jejich vazby na odvětvová kritéria týče, čtenář má možnost odkázat se v případě strukturálních map, názvosloví a přehledu na Metodiku hodnocení odolnosti vybraných prvků a systému prvků kritické infrastruktury (Lukáš, 2013) a Závěrečnou zprávu k veřejné zakázce Úřadu vlády ČR, Souhrn způsobů hodnocení kvality a odolnosti infrastruktury (Řehák et al., 2016).

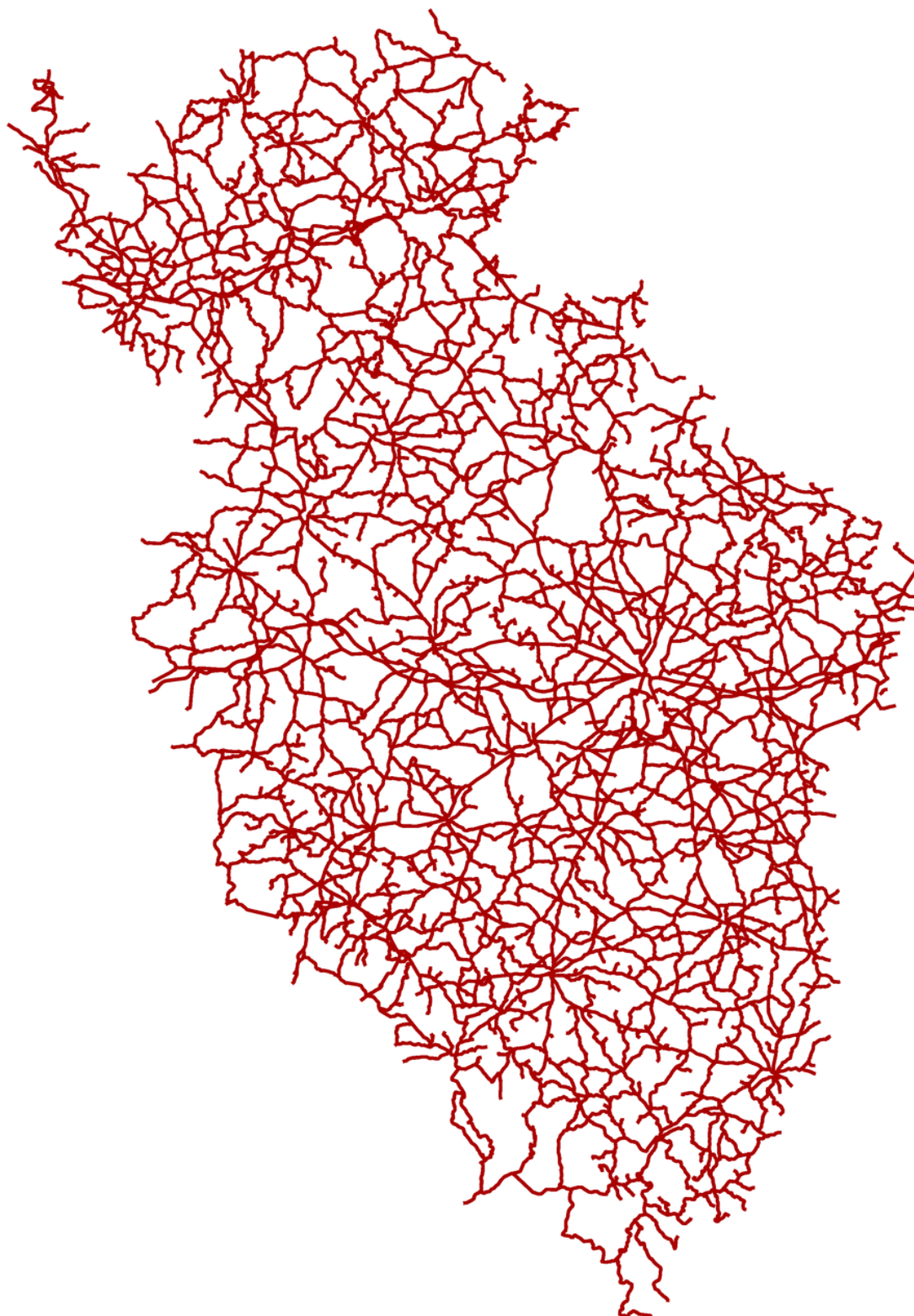
Z důvodu síťového pojetí úkolu testování prvků dopravní infrastruktury se v této metodice omezíme pouze na bodový prvek, který v našem abstraktním modelu grafu představuje objekt zájmu.

Nemusí se tedy jednat pouze o součást dopravní infrastruktury, jako např. úsek dálnice, most, tunel, opěrná zeď, křižovatka, atp., ale může jít o libovolný kritický objekt, jako např. nemocnice, trafostanice, muniční sklad, kasárny, atp. S pomocí těchto prvků je poté zformulován testovací scénář (např. obr. 2.1), kdy je dle povahy testovacích prvků zvolena vhodná míra abstrakce a typ analýzy. Samotný prvek poté může být přímo součástí síťového modelu v podobě uzlu nebo hrany, nebo může pouze identifikovat uzel, na jehož vlastnosti se analýza má zaměřit, a přímo tedy v síťovém grafu nefigurovat. Různé indikátory odolnosti dopravní infrastruktury jsou uvedeny v 1.3 a vlastnosti hran a uzlů, společně s obecnou teorií grafů, jsou uvedeny v kapitole 3 (Modelování dopravní infrastruktury).

Prvkem KI mohou být i služba nebo systémy, včetně informačních a komunikačních, řídících, které se ve své podstatě významně podílí na řízení rizik a rovněž mohou svou funkčností či nefunkčností ovlivnit míru kritičnosti prvku.



Obr. 2.1. Ilustrativní testovací scénář, kdy je uvažováno s požárem v nemocnici a problematikou přístupových cest, z nichž některé vedou přes řeku (modrá tlustá čára) po mostě a jiné mohou být ohroženy např. záplavou (!Z100) či zablokovány probíhající opravou (!OR).



Obr. 2.2. Reálná část silniční sítě ČR, na které bude možné po převedení na model grafu formulovat testovací scénáře, jako např. analogicky k výše uvedenému scénáři (obr. 2.1) identifikovat a kvantifikovat rizika související s přístupem do nemocniční sítě (tj. všech nemocnic).

2.3 MOŽNOST VZNIKU KRIZOVÉHO STAVU

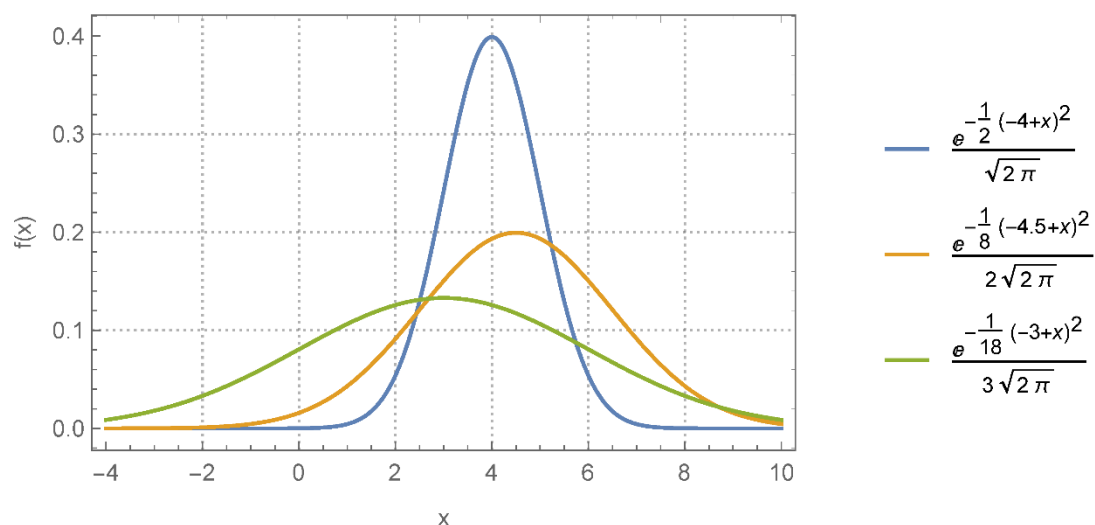
Za účelem kvantifikace nejistot a hrozeb spojených s užíváním pozemních komunikací je uvažována řada nepříznivých jevů, jejichž výskyt může být nepravděpodobný, ale jejichž následky mohou být velmi závažné (tzv. *low probability high consequence events*). Tyto jevy lze charakterizovat pomocí četnosti (např. doba návratu v letech), lze je dělit na stacionární/nestacionární. Některé můžeme předvídat nebo je známe, ale o jiných se dozvíme až zpětně. V případě výskytu těchto jevů je nutné minimalizovat dobu nutnou k obnovení funkce t_{rec} . Jsou-li k dispozici dostatečná data o výskytu, lze jejich výskyt modelovat pomocí modelu rozdělení hustoty pravděpodobnosti, případně, pokud jsou zkušenosti omezené, je možné výskyt aproximovat pomocí pravděpodobnostních intervalů nebo tzv. fuzzy popisu.

Příklad relevantní k riziku spojeném s provozem na silničních komunikacích je uveden v tabulce 1.

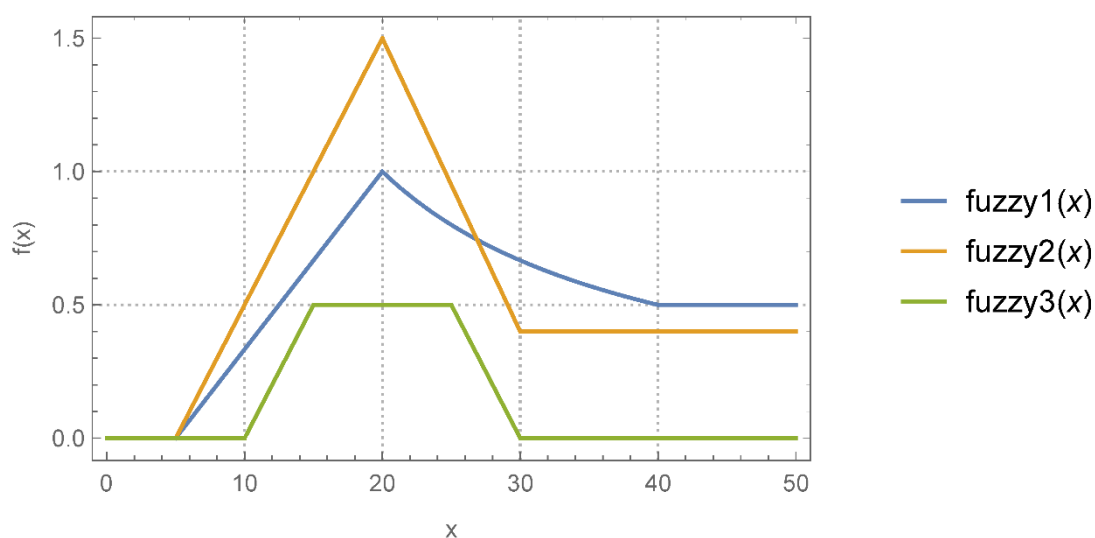
Tabulka 1. Krátký příklad nepříznivých jevů a jejich základní charakteristika.

ID	Jev	Doba návratu [roky]	Doba obnovy [dny]
Z100	Záplava Q100	100	10 – 3000
Str.	Spadlý strom	1	0,5 – 5
Pož.	Požár	5	1 – 100
SP.	Sesuv půdy	10	14 – 365
PS	Protest/Stávka	2	7 – 365
SK	Sněhová kalamita	1/3	1/12 – 3
OR	Oprava/rekonstrukce	12	7 – 1000
Hav.	Havárie	40	0,5 – 3

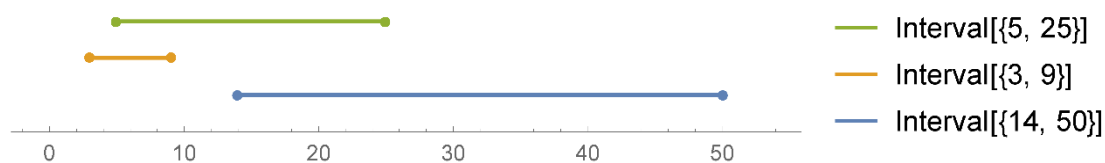
a)



b)



c)



Obr. 2.3. Příklady možností aproximace výskytu extrémních jevů pomocí a) spojitých rozdělení hustoty pravděpodobnosti, b) fuzzy funkcí a c) intervalů.

3 MODELOVÁNÍ DOPRAVNÍ INFRASTRUKTURY

Jestliže máme dopravní síť, tak je přirozené zkoumat, zda je v síti možné cestovat nebo dopravovat produkty z místa *A* do místa *B*. Bude-li tato síť reprezentována grafem, bude možné zkoumat existenci cest mezi uzly. Předpokládáme, že mezi uzly je dovoleno putovat pouze po hranách grafu. Cílem je umět rozpoznat, jak odolná je daná síť vůči poruchám, které mohou narušit komunikaci nebo transport v síti. Výpadky mohou být dvojího druhu: porucha může nastat jednak v rámci každého spojení, které odpovídá hraně grafu (silniční úsek), nebo v uzlech (křižovatkách) sítě.

V kapitole 1.3 jsou uvedeny indikátory odolnosti dopravní infrastruktury, jako je kvantifikovaná resilience, robustnost a redundance, a které lze aplikovat na dopravní síť. V kapitole 4 je doporučený postup k testování celé sítě, jednoho vybraného prvku či dvojice prvků.

3.1 TEORIE GRAFŮ

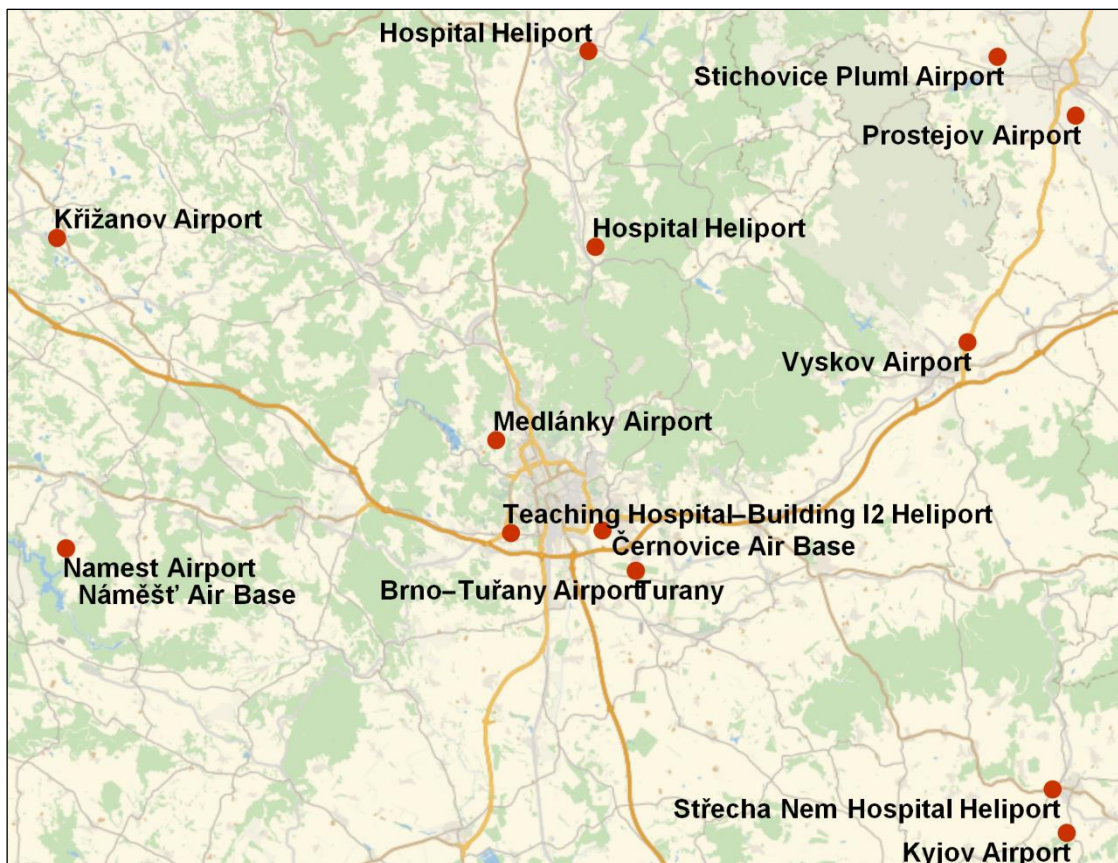
Pojem grafu je jedním z ústředních pojmů současné diskrétní matematiky, kde grafem rozumíme algebraickou strukturu, která přehledně popisuje objekty a vztahy mezi nimi. Na obr. X je ukázka náhodně vygenerovaného neorientovaného grafu, který je tvořen řadou objektů (dále uzly) a jejich spojníc (hrany). Pokud uvažujeme o reprezentaci dopravní sítě, např. silniční sítě, může být užitečné zavést orientaci hrany, která bude označena šipkou znázorňující povolený směr komunikace. Ještě obecnější pojem než orientovaný graf je multigraf, kde mohou existovat vícenásobné hrany i smyčky. V pseudografech mohou být současně orientované i neorientované a násobné hrany. Podrobnější úvod do teorie grafů lze nalézt např. v (Kovář, 2012). Konkrétní aplikace teorie grafů na hodnocení dopravní sítě lze nalézt např. v odborných pracích (Demšar, Špatenková, & Virrantaus, 2008; Derrible & Kennedy, 2011; Xie & Levinson, 2007).

Konceptuální přístup k tvorbě grafu je uveden na obr. 3.1 až 3.3, kde je nejprve geografickým dotazem vybráno 15 zájmových prvků (letišť) ve vztahu k výchozímu prvku (městu Brnu) dle euklidovské vzdálenosti do 50-ti km. Následně vzniká základní topologie grafu bez a s uvažáním souřadnic zájmových prvků (uzlů).

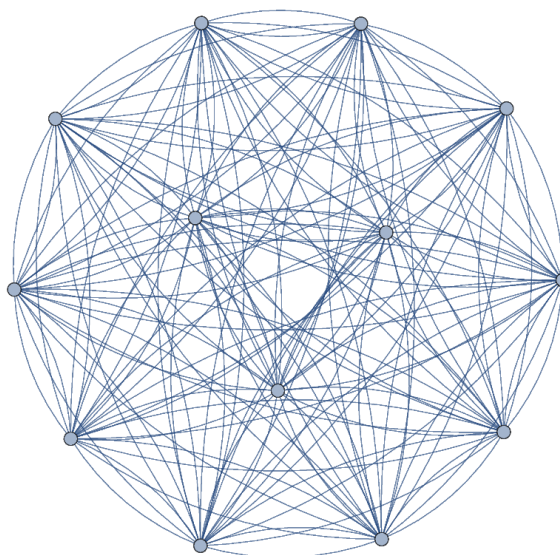
Ilustrativní příklad neorientovaného grafu o sedmi uzlech a dvanácti hranách je vidět na obr. 3.4. Z hlediska dopravní obslužnosti je zde nejzranitelnější uzel č. 7, protože jeho napojení tvoří pouze dvě hrany, a za předpokladu stejných vlastností hran. Za stejných předpokladů lze dále označit uzel č. 2 za hlavní (centrální či tzv. „hub“), neboť je napojen na nejvíce uzlů.

Ukázky grafů, které reprezentují skutečné infrastrukturní sítě, jsou vidět na obr. 3.5 a 3.8, kde jako podklad slouží silniční síť Plzeňského kraje a síť linek metra ve městě Seoul.

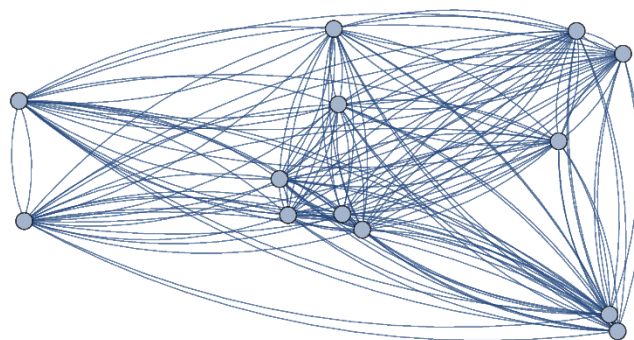
Ukázka dvou zcela topologicky odlišných náhodně vygenerovaných grafů je na obr. 3.6 a 3.7, které mohou reprezentovat odlišné přístupy k návrhu a modelování silniční sítě. Možné postupy k jejich kvantitativnímu popisu jsou detailně popsány v kapitole 4 a přílohách 1 až 3.



Obr. 3.1. Ukázka výsledku geografického dotazu na všechna letiště v 50-ti kilometrovém okruhu kolem města Brna.

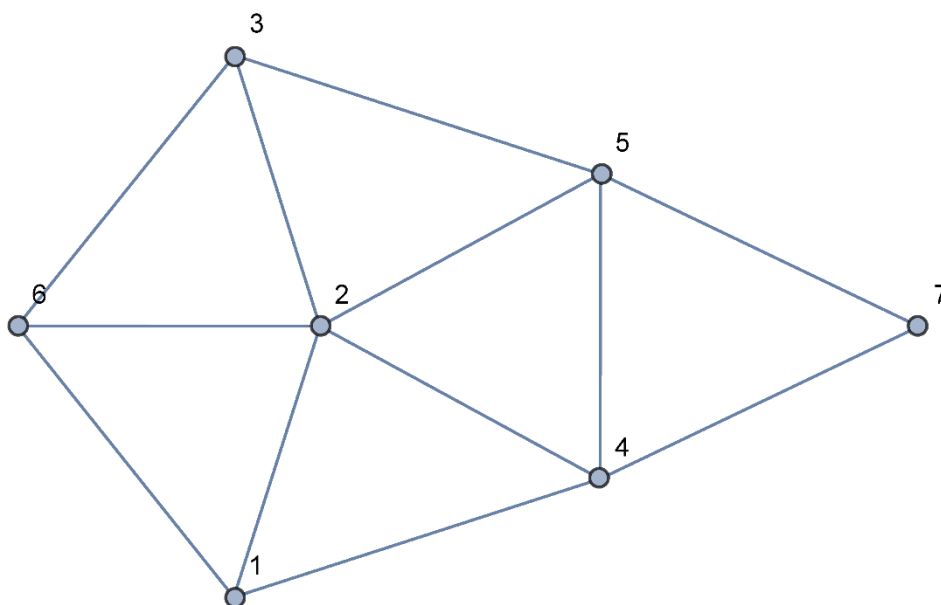


Obr. 3.2. Převod výsledku dotazu na všechna letiště v 50-ti kilometrovém okruhu kolem města Brna na jednoduchý orientovaný graf, kde nejsou zohledněny skutečné vzdálenosti mezi letišti, pouze obousměrná propojenost všech uzlů.



Obr. 3.3. Převod výsledku dotazu na všechna letiště v 50-ti kilometrovém okruhu kolem města Brna na jednoduchý orientovaný graf, kde jsou zohledněny skutečné vzdálenosti mezi letišti, a je uvažována obousměrná propojenost mezi všemi uzly.

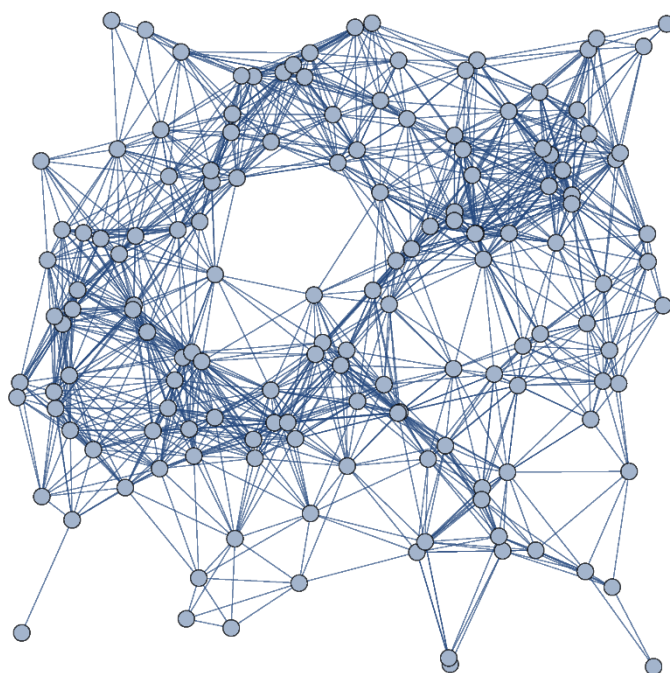
Na následujících příkladech je možné porovnat topograficky a velikostně odlišné typy grafů a jejich vlastností.



Obr. 3.4. Ilustrativní příklad neorientovaného grafu o sedmi uzlech a dvanácti hranách. Z hlediska dopravní obslužnosti je nejzranitelnější uzel č. 7, protože jeho napojení tvoří pouze dvě hrany, a za předpokladu stejných vlastností hran. Realita je složitější, viz následující kapitoly.

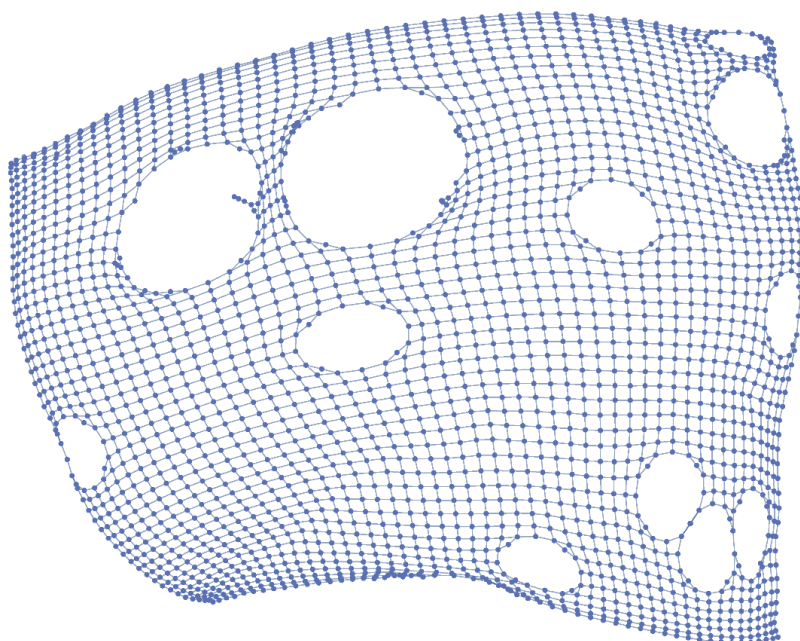


Obr. 3.5. Ukázka grafu reprezentujícího část silniční sítě ČR (Plzeňský Kraj, obr. 2.2). Z hlediska zranitelnosti této sítě je zřejmé, že přestože řada okrajových uzlů má pouze jedno napojení, nemusí se nutně jednat o jinak izolované uzly, ale pouze hranice správního celku, za nímž existují další napojení. Je tedy vždy na místě posouvat danou síť v kontextu a měřítku, které odpovídá testovacímu scénáři.

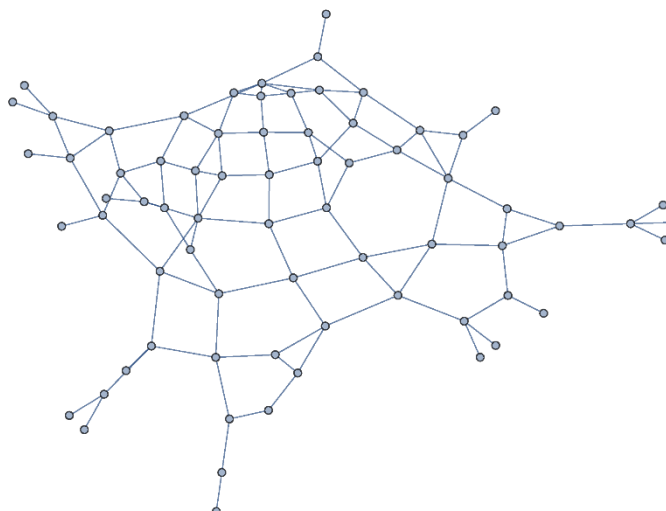


Obr. 3.6. Ukázka náhodně vygenerovaného grafu, který zde reprezentuje model silniční sítě.

Následující příklad demonstruje užitečnost prezentovaného nástroje při posuzování topologických odlišností jednotlivých modelů sítě a souvisejících teoretických konceptů, jako např. periodicitu či minimalizace vzdáleností, kdy byl použit odlišný generátor sítě (obr. 3.7).



Obr. 3.7. Ukázka zcela topologicky odlišného (vzhledem k obr. 3.6) náhodně vygenerovaného grafu, který zde reprezentuje možný model silniční sítě.



Obr. 3.8. Ukázka grafu reálné sítě metra (Seoul).

3.2 VLASTNOSTI HRAN

Mezi nejběžnější typy hran, které lze uvažovat při síťovém testování odolnosti prvků dopravní silniční sítě, lze zařadit dle zvoleného měřítka v prostředí ČR následující (jednotlivě či v logické kombinaci):

- a) Silniční úseky
- b) Dálniční úseky
- c) Tunely
- d) Mosty
- e) Opěrné zdi
- f) Geotechnické stavby.

Jeich nejběžnější vlastnosti, které lze uvažovat při testování odolnosti prvků dopravní silniční sítě, mohou být v prostředí ČR následující (jednotlivě či v logické kombinaci):

- g) Dopravní význam
- h) Dopravní zatížení
- i) Klimatické a meteorologické podmínky
- j) Kapacita vozovky (šířky vozovky, počet pruhů)
- k) Nehodovost, bezpečnostní inspekce
- l) Hranice obce
- m) Objekt
- n) Zemní těleso
- o) Skladba vozovky
- p) Technologie a doba poslední realizace údržby, opravy a rekonstrukce
- q) Záruční doba

Za předpokladu dostupnosti statistických dat je poté vhodné uvést následující základní a odvozené charakteristiky:

- r) pravděpodobnostní popis vzniku krizového stavu (doba návratu) dle typu (tab.1)

- s) pravděpodobnostní popis doby do obnovy funkce dle typu (tab.1)
- t) index zranitelnost
- u) Souvztažnost k ostatním hranám v síti (např. závislost na dodávce elektrické energie, záplavové území, atp.) – např. viz korelační matice z 2.3.

V souladu s charakteristikou prvků z 2.2 může být uzlem pro formulaci testovacího scénáře i prvek mimo vlastní infrastrukturu, která je předmětem testování.

Co se dále týče detailnějšího posuzování kvality Českých silnic a dálnic, je možné vlastnosti hran rozšířit o následující veličiny (proměnné parametry vyjádřené stanovenou hodnotou nebo klasifikačním stupněm), ideálně opět statisticky vyjádřené v podobě vyšších momentů (typ distribuční funkce a její parametry):

- 1) Součinitel tření
- 2) podélná nerovnost (IRI)
- 3) Hloubka vyjetých kolejí
- 4) Hloubka vody a odvodnění povrchu vozovky
- 5) MPD (makrotextura)
- 6) Příčný sklon
- 7) Akustické parametry (hluk)
- 8) Povrchové a podpovrchové odvodnění
- 9) Poruchy vozovky povrchové (% postižené plochy vysprávkami, korozí a trhlinami)
- 10) Poruchy konstrukční (% postižené plochy mozaikovými a sítovými trhlinami asfaltových vozovek a trhlinami CB desek, místními a plošnými deformacemi povrchu vozovky)
- 11) Případně únosnost asfaltových vozovek (převedení údajů z diagnostického průzkumu)

Nepředpokládá se ale, že bude pokaždé nutné pracovat na síťové úrovni s takto podrobnou charakteristikou proměnných parametrů vozovek. Ve většině testovacích scénářů zřejmě postačí zavést kombinovanou hodnotu kvality dálnic a silnic, která výše uvedené veličiny charakterizuje, je např. možné využít stávající stupnice 1 (nejlepší) až 5 (nejhorší) ("Silniční databanka a NDIC," n.d.).

Podobně bude vhodné zredukovat řadu výše uvedených proměnných parametrů a poruch do degradačních modelů na základě časového vývoje homogenizovaných úseků (hran). Degradací modely každého homogenního úseku mohou být opět pravděpodobnostně vyjádřeny a měly by zohlednit veškeré vlivy dané dopravním zatížením, šířkou vozovek, typem objektů, zemních těles, skladbou vozovek, místními podmínkami, zvyklostmi a kvalitou jednotlivých správců.

3.3 VLASTNOSTI UZLŮ

Mezi nejběžnější typy prvků, které lze uvažovat při síťovém testování odolnosti prvků dopravní silniční sítě, lze zařadit dle zvoleného měřítka v prostředí ČR:

- a) Křižovatky
- b) Tunely
- c) Mosty, podjezdy
- d) Opěrné zdi
- e) Geotechnické stavby

- f) železniční přejezdy
- g) brody

Jejich nejběžnější vlastnosti, které lze uvažovat při testování odolnosti prvků dopravní silniční sítě, mohou být v prostředí ČR:

- h) Dopravní význam
- i) Dopravní zatížení
- j) Klimatické a meteorologické podmínky
- k) Kapacita uzlu (šířka vozovky, počet pruhů)
- l) Nehodovost, bezpečnostní inspekce
- m) Hranice obce
- n) Objekt
- o) Zemní těleso
- p) Skladba vozovky
- q) Technologie a doba poslední realizace údržby, opravy a rekonstrukce
- r) Záruční doba

Za předpokladu dostupnosti statistických dat je poté vhodné uvést následující základní a odvozené charakteristiky pro uzel:

- s) pravděpodobnostní popis vzniku krizového stavu (doba návratu) dle typu (tab.1)
- t) pravděpodobnostní popis doby do obnovy funkce dle typu (tab.1)
- u) index zranitelnost
- v) Souvztažnost k ostatním hranám v síti (např. závislost na dodávce elektrické energie, záplavové území, atp.) – např. viz korelační matice z 2.3.

V souladu s charakteristikou prvků z 2.2 může být uzlem pro formulaci testovacího scénáře i prvek mimo vlastní infrastrukturu, která je předmětem testování.

Dále je možné, podobně jako v případě vlastností hran (3.2), detailněji posuzovat následující veličiny (proměnné parametry vyjádřené stanovenou hodnotou nebo klasifikačním stupněm) pro kompatibilní typ uzlu (křižovatky, tunely, mosty), ideálně opět statisticky vyjádřené v podobě vyšších momentů (typ distribuční funkce a její parametry):

- 1) Součinitel tření
- 2) Podélná nerovnost (IRI)
- 3) Hloubka vyjetých kolejí
- 4) Hloubka vody a odvodnění povrchu vozovky
- 5) MPD (makrotextura)
- 6) Akustické parametry (hluk)
- 7) Povrchové a podpovrchové odvodnění
- 8) Poruchy vozovky povrchové (% postižené plochy vysprávkami, korozí a trhlinami)
- 9) Poruchy konstrukční (% postižené plochy mozaikovými a sítovými trhlinami asfaltových vozovek a trhlinami CB desek, místními a plošnými deformacemi povrchu vozovky)
- 10) Případně únosnost asfaltových vozovek (převedení údajů z diagnostického průzkumu)

V souladu s charakteristikou prvků z 2.2 může být uzlem pro formulaci testovacího scénáře i prvek mimo vlastní infrastrukturu, která je předmětem testování.

Podobně jako v případě 3.2 se opět nepředpokládá že, že bude pokaždé nutné pracovat na síťové úrovni s takto podrobnou charakteristikou proměnných parametrů. Ve většině testovacích scénářů zřejmě postačí zavést kombinovanou hodnotu kvality dálnic a silnic, která výše uvedené veličiny charakterizuje, je např. možné využít stávající stupnice 1 (nejlepší) až 5 (nejhorší) ("Silniční databanka a NDIC," n.d.).

Stejně tak bude vhodné zredukovat řadu výše uvedených proměnných parametrů a poruch do degradačních modelů na základě časového vývoje homogenizovaných úseků (hran). Degradací modely každého homogenního úseku mohou být opět pravděpodobnostně vyjádřeny a měly by zohlednit veškeré vlivy dané dopravním zatížením, šířkou vozovek, typem objektů, zemních těles, skladbou vozovek, místními podmínkami, zvyklostmi a kvalitou jednotlivých správců.

V případě mostů, tunelů, opěrných zdí a geotechnických staveb bude navíc nutné výše uvedené charakteristiky rozšířit o relevantní typ údajů popisující konstrukční údaje (parametry zatížitelnosti, podélný a příčný průřezný profil, atp.), jejichž úplný výčet vzhledem k rozsahu této metodiky není uveden, ale které opět bude možné zredukovat klasifikačním stupněm (např. u mostů se používá stupeň 1 až 7) ("Silniční databanka a NDIC," n.d.) a místně specifickým degradačním modelem. Data lze převzít v případě mostů z pasportu objektu, přehledu stavu a zatížitelnosti tak, jak je eviduje např. Bridge Management System – BMS ("Silniční databanka a NDIC," n.d.).

Jako jeden z návrhových scénářů lze uvést obranu země a možnou vojenskou mobilitu, kdy součástí posouzení budou parametry kritických součástí sítě (linie, uzly), v případě vojenské mobility tedy např. únosnost mostů či průjezdnost křižovatek (zejména kruhových), a dále pravděpodobnost vzniku krizového stavu, zranitelnost, redundance, robustnost či resilience. Pokud parametry sítě nesplňují kritéria jasně stanovená požadavky na vojenskou mobilitu, tak musí být připravena opatření na její vybudování či rychlou dočasnou úpravu.

Dále je třeba připomenout, že rovněž monitorovací systémy, telemetrie a dopravní značení mohou zásadně ovlivnit parametry sítě. Je možné je zohlednit buď přímo jako prvky nebo nepřímo prostřednictvím upravených vlastností hran či uzlů.

4 DOPORUČENÝ POSTUP

Následující výčet obsahuje základní výčet postupů pro testování prvků kritické dopravní infrastruktury, z nichž některé jsou obecně využitelné i pro jiný druh síťových infrastruktur (jako např. ICT, energetika). Při práci s rozsáhlou sítí (např. příklad z 2.2 a 3.5) je doporučeno využít specializovaných GIS nástrojů (OpenGis, ArcGis) a zabudovaných funkcí, případně uživatelských maker, které umožní obecnou formulaci testovacích scénářů a následných analýz. Další možností je využít některého ze systémů počítačové algebry (Mathematica, Matlab, Maple, R), které také umožňují zcela obecnou formulaci testovacích scénářů a následných síťových analýz, nabízí řadu pokročilých funkcí diskrétní matematiky a zároveň zvládají práci s běžnými formáty geografických dat, jako např. datový formát pro ukládání vektorových prostorových dat pro geografické informační systémy Esri Shapefile (shp).

Doporučenou alternativou je také softwarový nástroj **NetIR**, jehož popis je v příloze 1, a na jehož základě vznikly příklady prezentované v této metodice, s výjimkou ilustrací převzatých z Moovellab (se svolením autora).

Nad rámec uvedeného v 1.3 (indikátory odolnosti), tj. kvantifikace Resilience, Robustnosti a Redundance, a 3. (modelování dopravní infrastruktury), lze doporučit následující postupy, které se mimo povahy testovacího scénáře mohou lišit i počtem analyzovaných prvků v rámci řešené sítě, tj. od všech prvků (4.1, červené body na mapě ČR jako významná sídla), přes jeden prvek (4.2, červený bod jako vztah k městu Brnu), až po dva prvky (4.3, dva červené body jako vztah Brna a Prahy).

4.1 TESTOVÁNÍ DOPRAVNÍ SÍTĚ JAKO CELKU

4.1.1 Detekce páteřní sítě: z $\forall A$ do $\forall B$

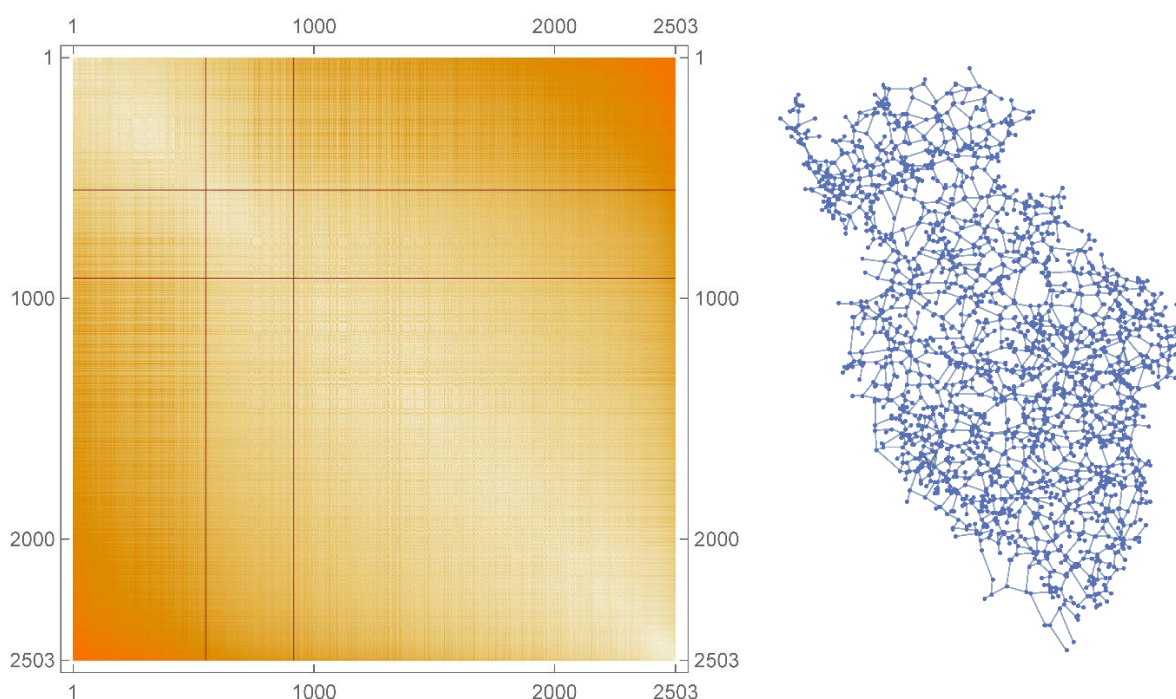
Automatická detekce kritických prvků infrastruktury (hran) v grafu nebo podgrafu na základě simulace, kdy se hledá optimální trasa mezi všemi existujícími dvojicemi uzlů. Hrany s maximální hustotou lze považovat za důležité. Následně lze tuto kritickou hranu deaktivovat a opakovat simulaci, kdy se hledá optimální trasa mezi všemi existujícími dvojicemi uzlů, ale tentokrát bez oné „páteřní“ hrany. Tímto lze sledovat schopnost adaptace vybrané silniční sítě na výpadek důležitého, automaticky detekovaného, silničního úseku. Je však třeba zvážit, zda je taková úloha z hlediska výpočetních prostředků proveditelná.

Jednodušší příkladu lze řešit analyticky, jako např. ilustrativní příklad neorientovaného grafu o sedmi uzlech a dvanácti hranách z obr. 3.4. Z hlediska dopravní obslužnosti je zde nejzranitelnější uzel č. 7, protože jeho napojení tvoří pouze dvě hrany, a za předpokladu stejných vlastností hran. Za stejných předpokladů lze dále označit uzel č. 2 za hlavní (centrální či tzv. „hub“), neboť je napojen na nejvíce uzlů.

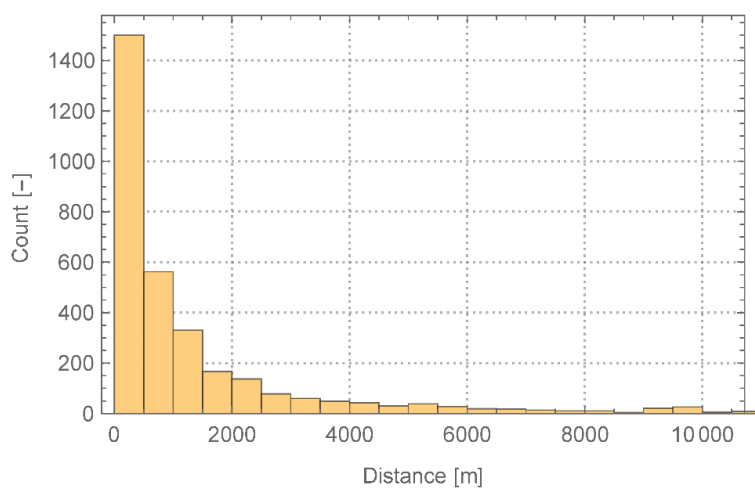
Složitější (nepravidelné a rozsáhlé) grafy lze řešit pouze prostřednictvím simulace, viz např. 4.2.1 až 4.2.3, jen s tím, že nebude analyzován vztah Brnu ke zbytku sídel ale všechny trasy mezi dvojicí uzlů (sídel).

4.1.2 Analýza vzdáleností, cestovních časů a dalších vlastností sítě

Mezi všemi dvojicemi uzlů lze na síťové úrovni analyzovat přímé vzdálenosti, délky tras po (vybraných) pozemních komunikacích, čas nutný k cestě, a další vlastnosti. Jako příklad je na obr. 4.1.1 uvedena matice vzdáleností mezi všemi dvojicemi uzlů pro síť Plzeňského kraje z obr. 3.5, a dále histogram vzdáleností mezi všemi dvojicemi uzlů pro tuto stejnou síť.

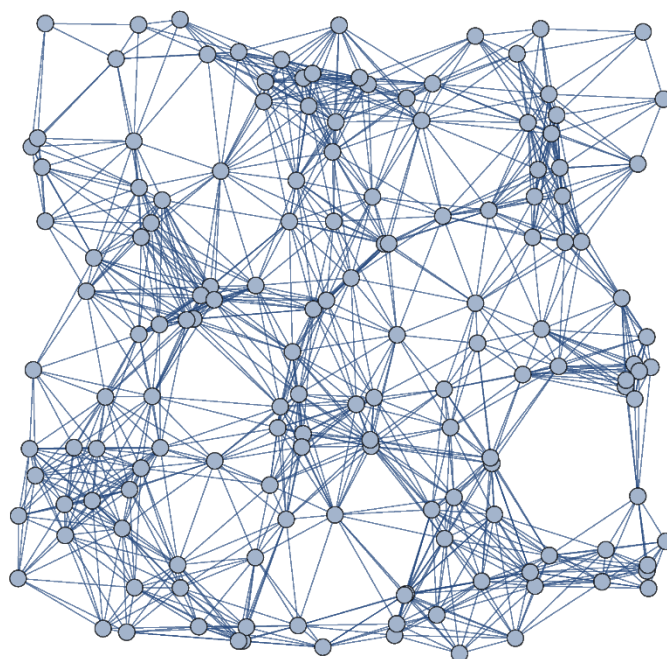


Obr. 4.1.1 Matice vzdáleností mezi všemi dvojicemi uzlů pro síť Plzeňského kraje z obr. 3.5.

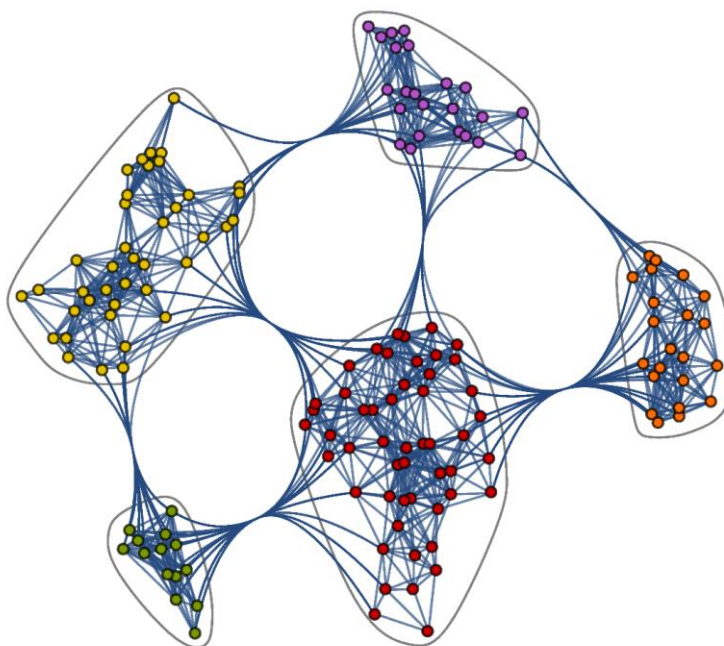


Obr. 4.1.2 Histogram vzdáleností mezi všemi dvojicemi uzlů pro síť Plzeňského kraje z obr. 3.5.

4.1.3 Identifikace prostorových struktur



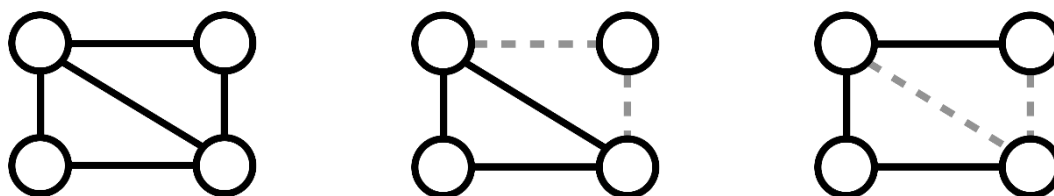
Obr. 4.1.3 Náhodně vygenerovaný neorientovaný graf, jehož prostorová struktura bude vyhodnocena na následujícím obr. 4.1.4.



Obr. 4.1.4 Náhodně vygenerovaný neorientovaný graf z obr. 4.1.3, jehož vizualizace je založena na identifikovaných prostorových strukturách dle topologické vzdálenosti.

4.1.4 Resilience sítě dle Sudakov a Vu

Jedna za současných definic resilience sítě, kterou navrhli (Sudakov & Vu, 2008), je založena na binárním konceptu, který předpokládá existenci či odebrání hrany ze sítě. Důvod odebrání hrany není z hlediska tohoto hodnocení relevantní, ať už se jedná o záplavu, sněhovou bouři či uzavírku z důvodu rekonstrukce (více v 2.3 Možnost vzniku krizového stavu). Kvantifikace je založena na stanovení (výpočtem či simulací) minimálního počtu hran, které můžeme odebrat ze sítě, aby došlo ke změně vlastností sítě. Onou změnou vlastností může být např. ztráta obslužnosti konkrétního uzlu. Ilustrativní příklad na obr. 4.1.5, kde se předpokládá odebrání minimálně dvou hran, aby došlo ke ztrátě obslužnosti některého z uzlů, tedy ke změně vybrané vlastnosti. Hodnota síťové resilience v tomto případě bude 2.



Obr. 4.1.5 Ilustrativní příklad sítě s hodnotou resilience 2.

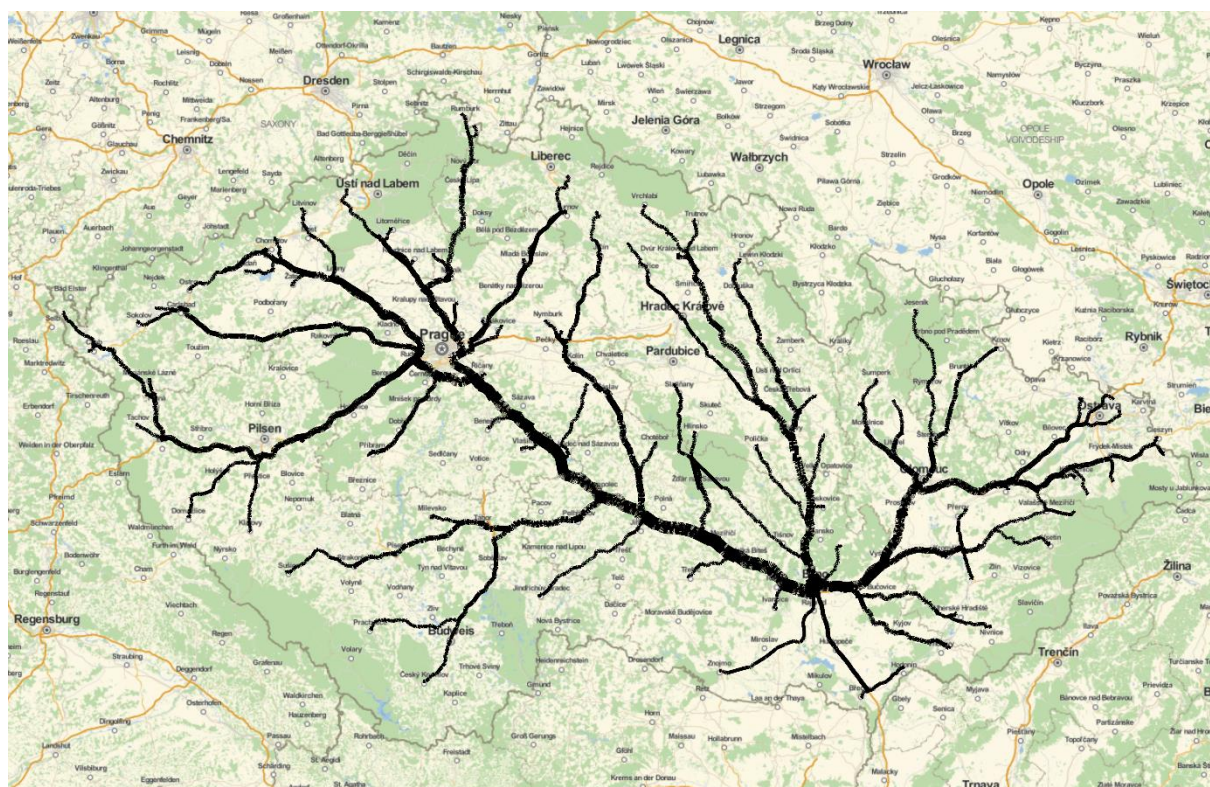
Tato definice může být upravena tak, že se cíleně nehledá minimální množství hran k odebrání, aby došlo ke změně vybrané vlastnosti, ale že odebrání hran probíhá náhodně nebo pseudonáhodně s přihlédnutím ke vlastnostem hran (3.3). Lze také sledovat kvantifikovat změnu

vlastnosti sítě a odebrat i uzly, poté je možné např. dojít k závěru, že odstraněním konkrétního počtu hran došlo k průměrnému nárůstu cestovního času v síti o 50%.

4.2 TESTOVÁNÍ JEDNOHO VYBRANÉHO PRVKU

4.2.1 Detekce páteřní sítě: z A do VB

Následující příklad (Obr. 4.2.1) demonstruje možnost automatické detekce páteřní sítě ČR, která odpovídá úseku D1 mezi Prahou a Brnem, na základě vyhodnocení hustoty optimálních tras mezi Brnem a významnými sídly v ČR.



Obr. 4.2.1. „Všechny cesty vedou do Brna“: Automatická Identifikace páteřní sítě na základě vyhodnocení hustoty optimálních tras mezi Brnem a významnými sídly v ČR.

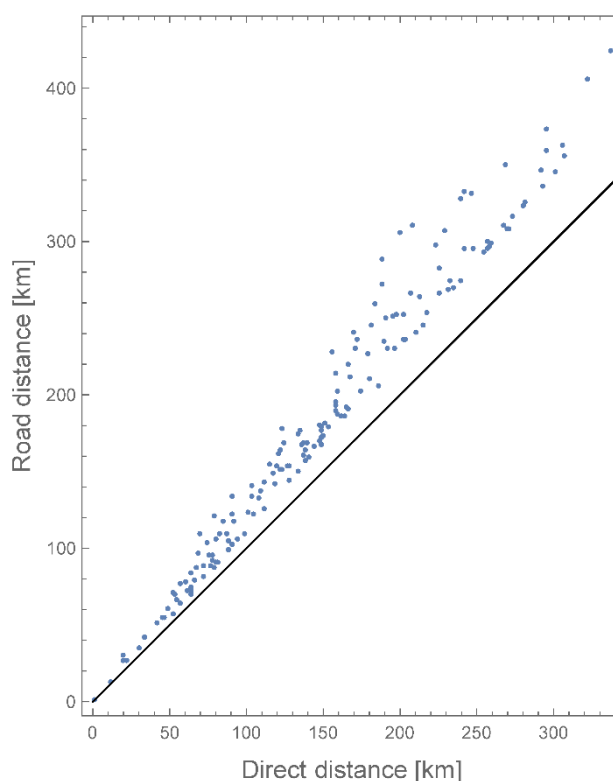
4.2.2 Analýza vzdáleností, cestovních časů a dalších vlastností sítě

Mezi vybraným uzlem A a všemi ostatními uzly B lze na síťové úrovni analyzovat přímé vzdálenosti, délky tras po (vybraných) pozemních komunikacích, čas nutný k cestě, a další vlastnosti.

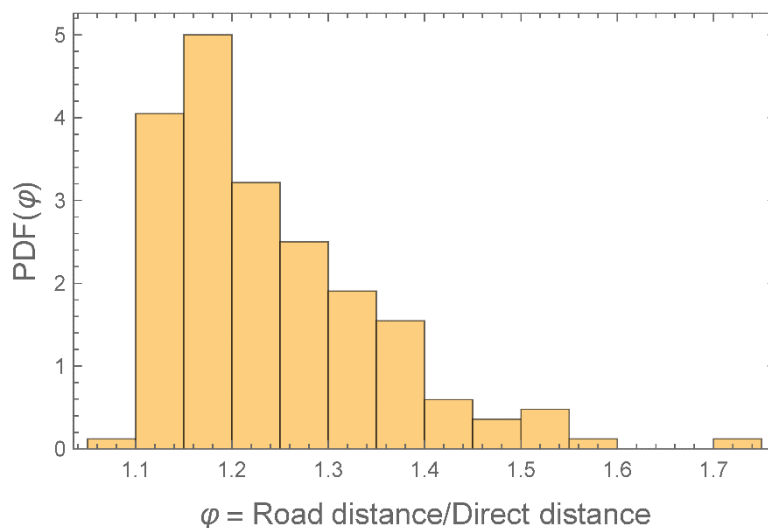
Jako příklad je na obr. 4.2.2 uvedena závislost mezi přímou vzdáleností a (vodorovná osa) a ujetou vzdáleností (svíslá osa), která je vyhodnocená pro příklad z obr. 4.2.1, automatické Identifikace páteřní sítě na základě vyhodnocení hustoty optimálních tras mezi Brnem a významnými sídly v ČR. Na obr. 4.2.3. je poté zobrazen histogram poměru přímé vzdálenosti a ujeté vzdálenosti z obr.

4.2.2, vyhodnocení dle příkladu z obr. 4.2.1, automatické Identifikace páteřní sítě na základě vyhodnocení hustoty optimálních tras mezi Brnem a významnými sídly v ČR.

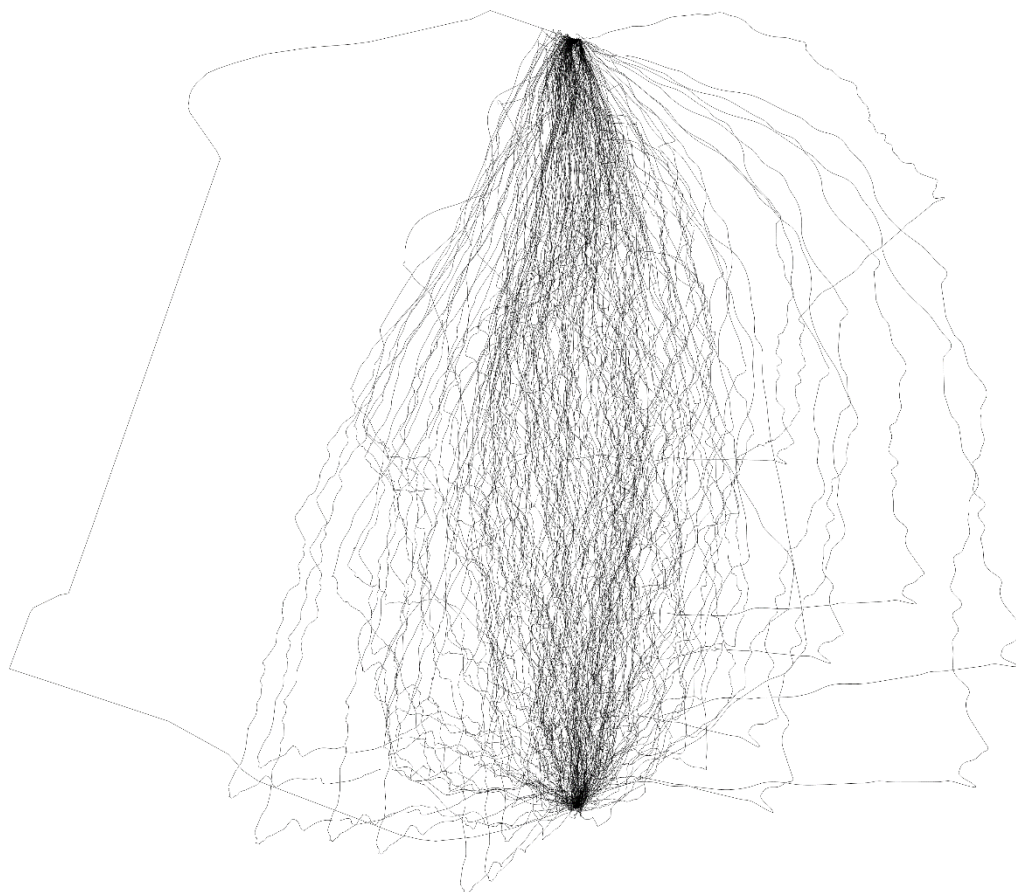
Dalším z užitečných nástrojů je normalizované vedení trasy mezi uzlem A a vybranými uzly B, na obr. 4.2.4. je ukázka vzniklých odchylek při normalizovaném vedení trasy mezi Brnem a vybranými sídly dle příkladu z obr. 4.2.1, automatické Identifikace páteřní sítě na základě vyhodnocení hustoty optimálních tras mezi Brnem a významnými sídly v ČR.



Obr. 4.2.2 Závislost přímé vzdálenosti (vodorovná osa) a ujeté vzdálenosti (svislá osa) vyhodnocená pro příklad z obr. 4.2.1, automatické Identifikace páteřní sítě na základě vyhodnocení hustoty optimálních tras mezi Brnem a významnými sídly v ČR.



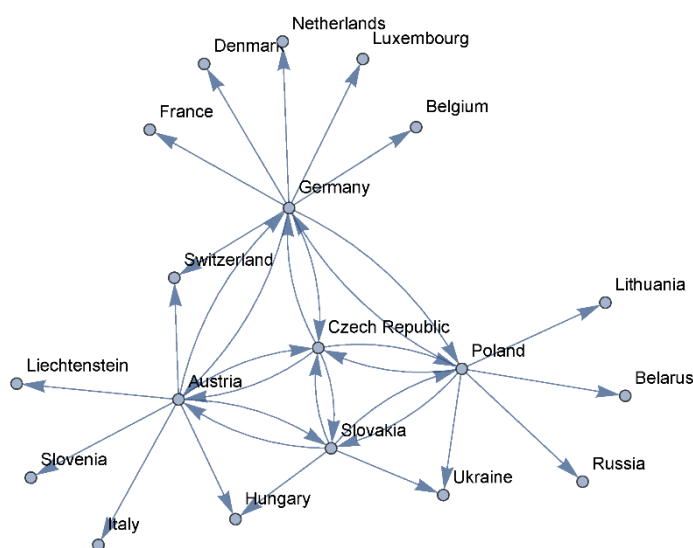
Obr. 4.2.3. Histogram poměru přímé vzdálenosti a ujeté vzdálenosti z obr. 4.2.2, vyhodnocení dle příkladu z obr. 4.2.1, automatické Identifikace páteřní sítě na základě vyhodnocení hustoty optimálních tras mezi Brnem a významnými sídly v ČR.



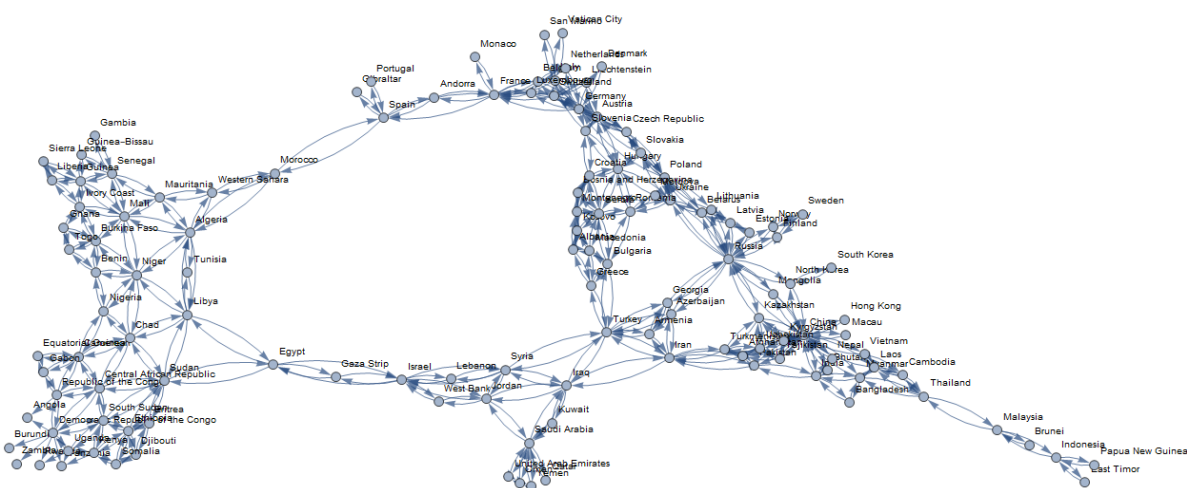
Obr. 4.2.4. Normalizované trasy mezi Brnem a vybranými sídly, vyhodnocení dle příkladu z obr. 4.2.1, automatické Identifikace páteřní sítě na základě vyhodnocení hustoty optimálních tras mezi Brnem a významnými sídly v ČR.

4.2.3 Analýza širších vztahů

Za účelem analýzy širších vztahů (Makroanalýza) je vybranou sítí či podsítí redukovat na pouhý prvek (uzel) a zaměřit se na analýzu vzniklé topologie. Příklad je uveden na obr. 4.2.5, kde je celá dopravní infrastruktura ČR nahrazena jediným uzlem a tento napojen dle společných hranic a prostřednictvím orientovaného grafu se sousedícími státy na poloměru 2. Na následujícím obrázku, 4.2.6, je tento poloměr rozšířen na 10 a je umožněn sousední vztah i mimo pevninu (pozemní vztah je má ale větší prioritu).



Obr. 4.2.5 Propojení České Republiky se sousedními státy na úrovni společných hranic, s uvážením poloměru 2.



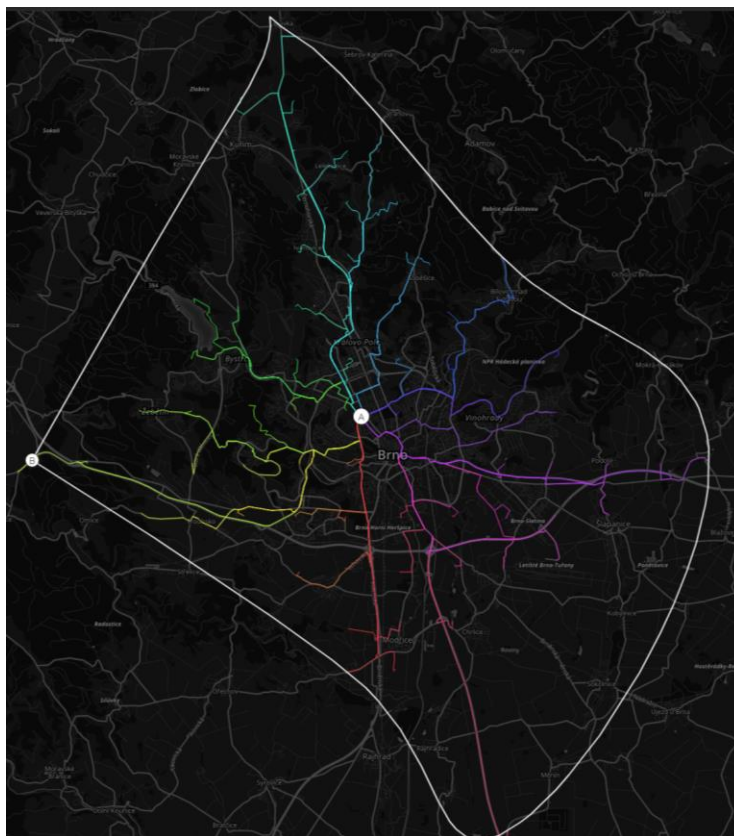
Obr. 4.2.6 Topologie sítě při propojení České Republiky se sousedními státy na úrovni společných hranic (i mimo pevninu), s uvážením poloměru 10.

4.2.4 Kvantifikace následků při odebrání vybraného prvku

V souladu s 4.1.4 (resilience sítě dle Sudakov a Vu) a 1.3 (indikátory odolnosti dopravní infrastruktury) lze formulovat scénáře (dle 1.3 modelování dopravní infrastruktury), které budou souviset s odebráním (výpadkem) vybraného prvku sítě (uzel nebo hrana) a poté porovnat vlastnosti nově vniklé sítě (dle 4.1 testování dopravní sítě jako celku) s těmi původními, opět dle 4.1 (testování dopravní sítě jako celku).

4.2.5 Využití existujícího projektu Urban Mobility Fingerprint

Mezi již existující nástroje k testování jednoho vybraného prvku je např. tzv. Urban Mobility Fingerprint ("ROADS TO ROME - Explore," n.d.), který pro zadaný bod A vygeneruje síť a obálku dojezdových vzdáleností dle zvoleného dopravního prostředku a doby cesty. Příklady 15-ti minutovou vzdálenosti autem či na kole jsou uvedeny na obr. 4.2.7 a 4.2.8



Obr. 4.2.7 Ukázka dojezdových vzdáleností (15 minut autem) z Fakulty Stavební v Brně ("ROADS TO ROME - Explore," n.d.)



Obr. 4.2.8 Ukázka dojezdových vzdáleností (15 minut na kole) z Fakulty Stavební v Brně ("ROADS TO ROME - Explore," n.d.).

4.3 TESTOVÁNÍ DVOJICE PRVKŮ

4.3.1 Kvantifikace spolehlivostních charakteristik: z A do B

Vyžaduje statistický popis (vyšších momentů) vlastností hran, uzlů a možnosti vzniku krizových stavů.

a) Spolehlivost S je možné vyjádřit jako

$$S = 1 - P_f$$

kde P_f je pravděpodobnost vzniku krizového stavu (výpadku funkce), kterou je možné na síťové úrovni stanovit pomocí výpočtu či simulace, kde se dle sériových či paralelních vazeb akumuluje pravděpodobnost výpadku funkce (pf) patřičných hran a/nebo uzlů na zvolené trase mezi A a B (pf nehody, pf povodně, pf sněhové kalamity, pf opravy/údržby), obecně v souladu s 2 (kritická dopravní infrastruktura) a 3 (modelování dopravní infrastruktury).

b) Riziko R je možné vyjádřit jako

$$R = pf \times c$$

kde c je celková cena následků (dle zvoleného rozsahu buď pouze pro trasu AB, celou síť, atp.).

c) *Spolehlivostní index* β je možné vyjádřit jako

$$\beta = \frac{E(SM)}{\sigma(SM)}$$

kde SM je bezpečnostní rezerva, E je funkce střední hodnoty a σ funkce směrodatné odchylky.

4.3.2 Charakteristika trasy

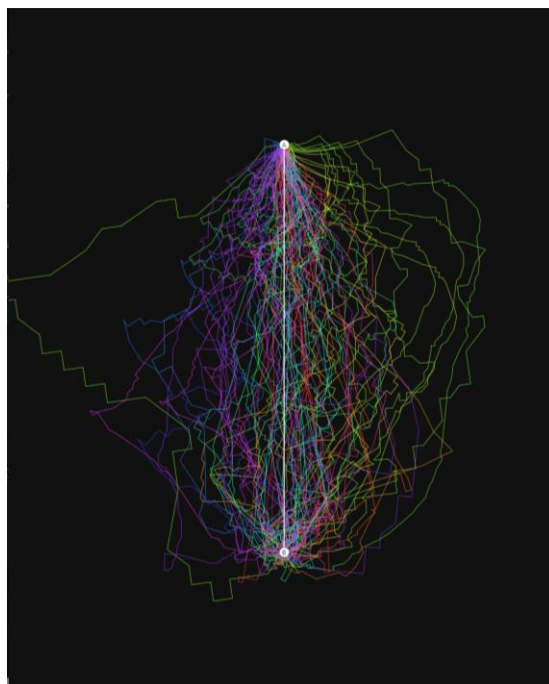
Množinu možných tras mezi dvojicí uzlů, tj. od optimálních tras až po objížd'ky, lze charakterizovat podobně jako v případě 4.1.2 a 1.2.2, (vzdálenosti přímé, pozemní, doba cestovního času), a navíc lze stanovit hodnotu kritičnosti úseku (trasy) v závislosti na počtu a charakteristice (navýšení vzdálenost a cestovního času) objížděných tras.

Mimo výše uvedené je v případě množiny tras mezi A a B vhodné aplikovat koncept resilience podle 1.3.1.

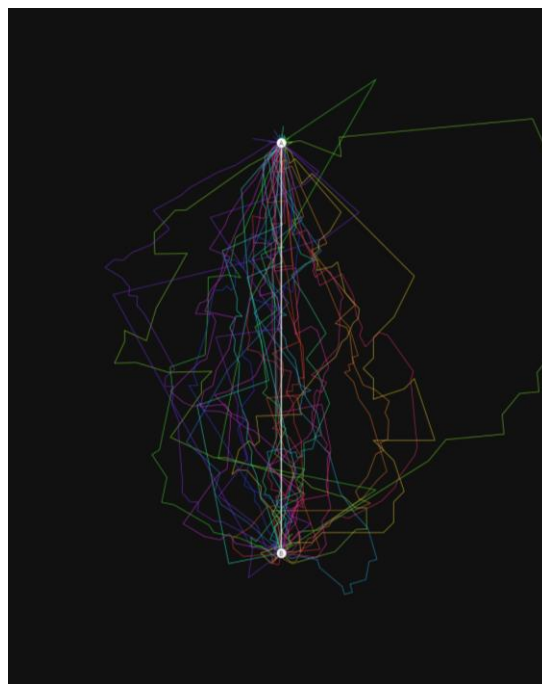
4.3.3 Využití existujícího projektu „Street DNA“

Moovel lab, Stuttgart, („ROADS TO ROME - Explore,” n.d.) nabízí aplikaci tzv. „Street DNA“ na zadanou oblast na mapě, která k zadanému bodu A analyzuje dojezdové vzdálenosti dle použitého dopravního prostředku a zadaného cestovního času, a následně vykreslí normalizované trasy mezi bodem A a všemi body na hranici dojezdové vzdálenosti. Ideální trasa je přímá spojnice mezi body A a B, a veškeré odchylky jsou dané reálnou topologií sítě, tedy překážkami typu vodní nádrže, rozlehlá nádraží, a neprůjezdná území obecně.

Část toho příkladu je uveden i v 4.2.5 v rámci 4.2 (testování jednoho vybraného prvku), neboť počátek řešení vyžaduje zadání jediného bodu. Tento nástroj lze ale logicky omezit na analýzu odchylek tras mezi dvěma body, kdy poté nebude nutné cíle normalizovat (existuje pouze jeden cíl).



Obr. 4.3.1 Odchylky od přímé trasy mezi bodem A (Fakulta Stavební v Brně) a všemi body na hranici 15-ti minutové dojezdové vzdálenosti autem – viz obr. 4.2.5.1)



Obr. 4.3.3 Odchylky od přímé trasy mezi bodem A (Fakulta Stavební v Brně) a všemi body na hranici 15-ti minutové dojezdové vzdálenosti na kole – viz obr. 4.2.5.1).

5 SEZNAM LITERATURY A ONLINE ZDROJŮ

- 1 240/2000 Sb. - o krizovém řízení a o změně některých zákonů (krizový zákon) - Text předpisu - Portál veřejné správy. (n.d.). Retrieved December 1, 2017, from <http://portal.gov.cz/app/zakony/zakonPar.jsp?idBiblio=49557&nr=240~2F2000&rpp=15#local-content>
- 2 Benjamin, J. R., & Cornell, C. A. (2014). *Probability, statistics, and decision for civil engineers*. Courier Corporation.
- 3 Demšar, U., Špatenková, O., & Virrantaus, K. (2008). Identifying critical locations in a spatial network with graph theory. *Transactions in GIS*, 12(1), 61–82.
- 4 Department, A.-G. (n.d.). Emergency management. Retrieved December 1, 2017, from <https://www.ag.gov.au/EmergencyManagement/Pages/default.aspx>
- 5 Derrible, S., & Kennedy, C. (2011). Applications of graph theory and network science to transit network design. *Transport Reviews*, 31(4), 495–519.
- 6 European Commission : CORDIS : Projects and Results : RESILENS: Realising European ReSilience for Critical INfraStructure. (n.d.). Retrieved December 1, 2017, from http://cordis.europa.eu/project/rcn/194842_en.html
- 7 Ghosn, M., Frangopol, D. M., McAllister, T. P., Shah, M., Diniz, S., Ellingwood, B. R., ... Zhao, Z. L. (2014). Reliability-based performance indicators for structural members. *Journal of Structural Engineering*, (in review).
- 8 Kovář, P. (2012). Úvod do Teorie grafů. *Vysoká Škola Báňská. Technická Univerzita. Ostrava*.
- 9 Lukáš, L. (2013). Metodika hodnocení odolnosti vybraných prvků a systému prvků kritické infrastruktury. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně Fakulta aplikované informatiky Ústav bezpečnostního inženýrství.
- 10 Ministerstvo průmyslu a obchodu. (n.d.). Retrieved December 1, 2017, from <https://www.mpo.cz/>
- 11 Národní program ochrany kritické infrastruktury (2010) | Databáze strategií - portál pro strategické řízení. (n.d.). Retrieved December 1, 2017, from <https://www.databaze-strategie.cz/cz/mv/strategie/narodni-program-ochrany-kriticke-infrastruktury>
- 12 Oznámení o zahájení zadávacího řízení | Věstník veřejných zakázek. (n.d.). Retrieved December 1, 2017, from <https://www.vestnikverejnychzakazek.cz/Form02/Display/23344>
- 13 PETSCHACHER, M. (2004). Bauwerksmanagement (Asset-Management) mit Hilfe von BAUT. In *SECOND EUROPEAN PAVEMENT AND ASSET MANAGEMENT CONFERENCE, 21 TO 23 MARCH 2004 IN BERLIN: PROCEEDINGS, 2004*.
- 14 Podroužek, J., Strauss, A., & Bergmeister, K. (2014). Robustness-based performance assessment of a prestressed concrete bridge. *Structural Concrete*, 15(2), 248–257.
- 15 Procházková, D. (2012). *Bezpečnost kritické infrastruktury*. České vysoké učení technické v Praze.
- 16 Procházková, D. (2013). *Základy řízení bezpečnosti kritické infrastruktury*. České vysoké učení technické v Praze.
- 17 Řehák, D., Hromada, M., Šenovský, P., Kročová, Š., Apeltauer, T., & Pidhaniuk, L. (2016). Souhrn způsobů hodnocení kvality a odolnosti infrastruktury - Závěrečná zpráva k veřejné zakázce Úřadu vlády ČR. Fakulta bezpečnostního inženýrství, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- 18 Richter, R., & Kovářík, F. (2012). ODOLNOST KRITICKÉ INFRASTRUKTURY. Presented at the 17. medzinárodná vedecká konferencia Riešenie krízových situácií v špecifickom prostredí, Žilina.
- 19 Rinaldi, S. M., Peerenboom, J. P., & Kelly, T. K. (2001). Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies. *IEEE Control Systems*, 21(6), 11–25.

- 20 ROADS TO ROME - Explore. (n.d.). Retrieved December 6, 2017, from <http://roadstorome.moovellab.com/explore>
- 21 Silniční databanka a NDIC. (n.d.). Retrieved December 1, 2017, from <https://www.rsd.cz/wps/portal/web/rsd/Silnicni-databanka>
- 22 Solutions Modex. (n.d.). Retrieved December 1, 2017, from <http://www.solutionsmodex.com/inframodex>
- 23 Sudakov, B., & Vu, V. H. (2008). Local resilience of graphs. *Random Structures & Algorithms*, 33(4), 409–433.
- 24 Taylor, M. A., & D'Este, G. M. (2007). Transport network vulnerability: a method for diagnosis of critical locations in transport infrastructure systems. *Critical Infrastructure*, 9–30.
- 25 Traffic Infrastructure Sensor Network. (n.d.). Retrieved December 1, 2017, from <https://www.tno.nl/en/focus-areas/urbanisation/mobility-logistics/safe-mobility/traffic-infrastructure-sensor-network/>
- 26 U.S. Fire Administration. (n.d.). Retrieved December 1, 2017, from <https://www.usfa.fema.gov/index.html>
- 27 Ústav územního rozvoje -. (n.d.). Retrieved December 1, 2017, from <http://www.uur.cz/default.asp?ID=2571>
- 28 Xie, F., & Levinson, D. (2007). Measuring the structure of road networks. *Geographical Analysis*, 39(3), 336–356.

6 PŘÍLOHY

6.1 PŘÍLOHA 1: PŘEDSTAVENÍ SOFTWARE NÁSTROJE NETIR 1.0

Předkládaný softwarový nástroj si klade za cíl doplnit existující GIS nástroje o soubor metrik a funkcí, které nejsou standardně dostupné v režimech grafického uživatelského rozhraní (GUI) běžných GIS nástrojů ani jako volitelné nástavby či rozšíření. Z hlediska navržené funkcionality se jedná o kompromis mezi uživatelským komfortem (náročností) a univerzální využitelností, proto neobsahuje všechny zde prezentované metody.

Princip prezentovaného softwarového nástroje vychází ze síťového modelu pozemních komunikací, kdy kromě topologie je možné definovat i řadu atributů na úrovni hran, jako např. intenzity dopravy (CSD, celostátní sčítání dopravy), kapacity (nedá se strojově přiřadit z důvodu absence relevantních dat, jako např. podrobného pasportu křižovatek, dá se pouze odhadnout), nehodovost (jednotná vektorová dopravní mapa) nebo pravděpodobnost záplavy (z průběhu polygonů dílčích záplavových území).

Pravděpodobnosti poruchy u jednotlivých hran (Pf_h) lze aproximovat např. tak, že se v rámci sériového systému uvažuje se všemi inženýrskými stavbami (mosty, podjezdy, tunely, opěrné zdi) a jejich dílčími pravděpodobnostmi poruchy ($Pf_{h,i}$) na dané hraně a spočítá jejich společná pravděpodobnost poruchy jako následující produkt (P1):

$$Pf_h = 1 - \prod_{i=1}^n 1 - Pf_{h,i} \quad (P1)$$

Po úspěšném definování topologie sítě a přiřazení atributů umožňuje softwarový nástroj jednoduchým způsobem analyzovat síť jako celek nebo po zadání trasy analyzovat síť jako dvojici prvků ve vztahu k vybrané trase či všem trasám.

Mezi základní dostupné metriky sítě patří počet hran, počet uzlů, tzv. *link efficiency* (míra propojenosti grafu vzhledem k počtu uzlů), *Mean Clustering Coefficient* a *Vertex Connectivity* (nejmenší počet uzlů, jejichž odstraněním odpojíme část grafu, známé též pod pojmem *síťová resilience*).

Mezi grafické výstupy patří vizualizace zadané matice definující propojenost uzlů (tzv. *adjacency matrix*) a model grafu s vyznačenou zvolenou cestou.

Mezi textové výstupy patří kromě výše uvedeného analýza vybrané trasy, kdy je zobrazen následující přehled:

Pravděpodobnost poruchy [1/hod] na základě produktu dílčích pravděpodobností poruchy na trase, Spolehlivost [%] ve vztahu k pravděpodobnosti poruchy na trase, Riziko [Eur/hod] jako produkt ceny akumulovaných následků na trase (Produkt sumy dílčích intenzit a jednotkové ceny) a pravděpodobnosti poruchy na trase, dále Kapacita trasy [počet vozidel/hod] jako minimum z dílčích kapacit.

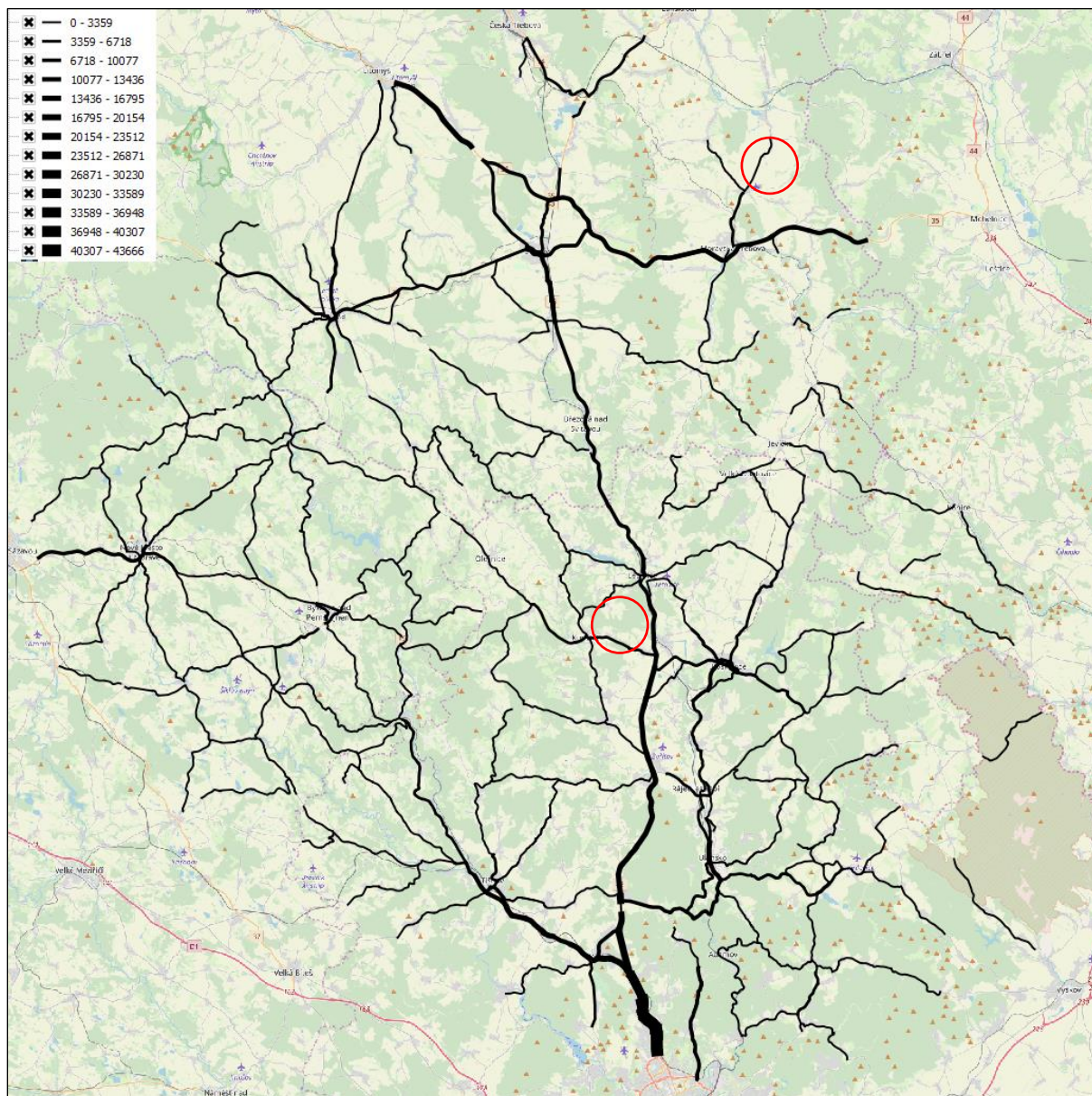
Dále je zobrazen přehled výsledků analýzy všech možných tras v podobě:

- Nejspolehlivější trasy a jejího ID, např.: *Nejspolehlivější je trasa č. 2: 98.1379 [%]*

- Nejméně rizikové trasy a jejího ID, např.: *Nejméně riziková je trasa č. 3: 335305. [Euro/hod]*
- Trasy s největší kapacitou, např.: *Nejkapacitnější je trasa č. 1: 1408.31 [vozidel/hod]*

6.2 PŘÍLOHA 2: DEFINICE MODELOVÉHO PŘÍKLADU

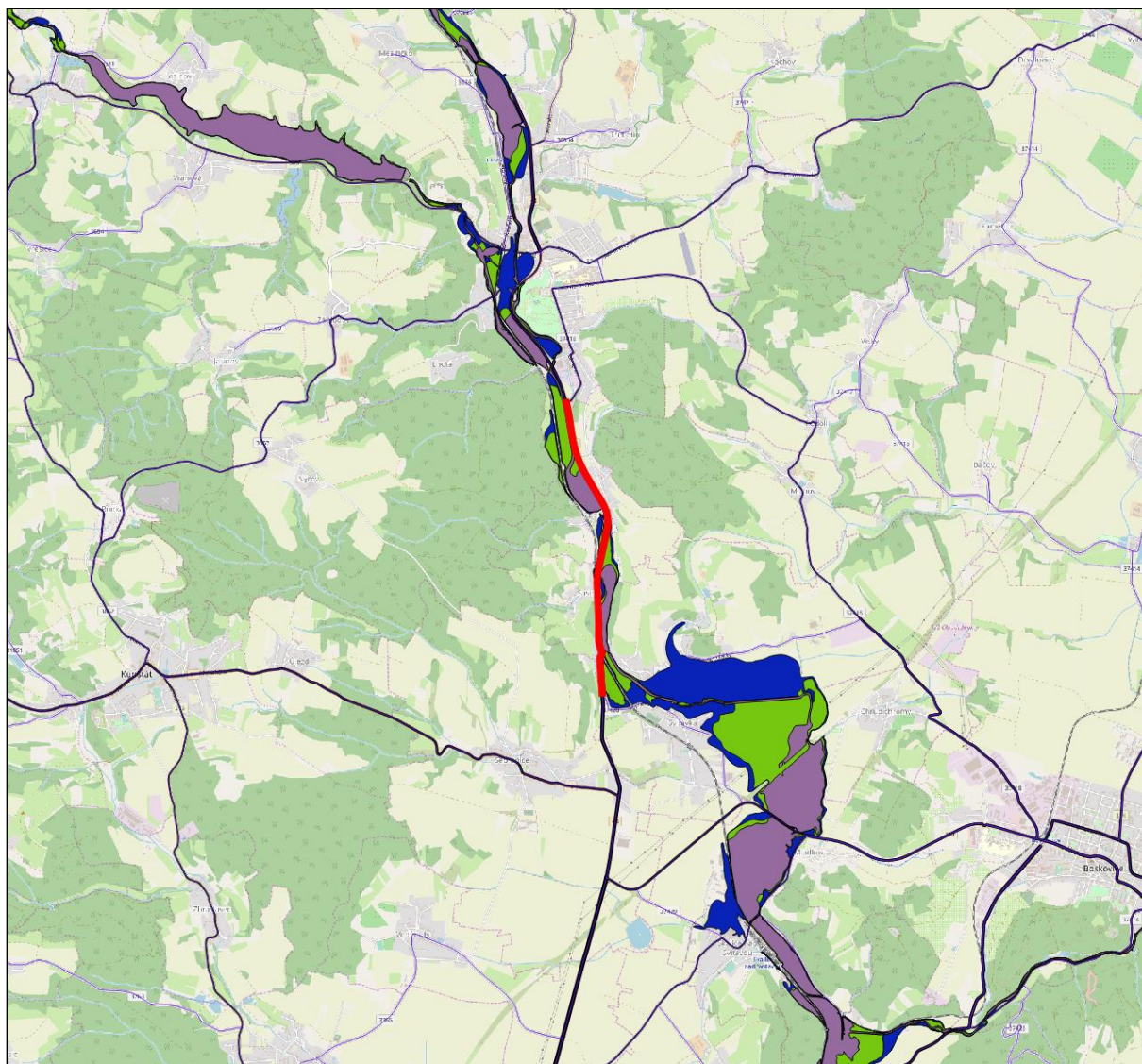
Definice modelového příkladu vychází z detailnějšího popisu, který je dostupný v metodice zaměřené na dostupné datové zdroje a představuje abstraktní směrově nerozlišený model grafu zájmového území s následujícími atributy: pravděpodobnost poruchy hran, dopravní intenzita hran, dopravní kapacita hran a jednotková cena za omezení funkce. Následující obrázky ilustrují nutnost pečlivé a často ruční práce při interpretaci a interpolaci z dostupných datových zdrojů. Topologie sítě byla připravena mimo prezentovaný softwarový nástroj, kam byla vložena jako textový vstup.



Obr. P1. Vizualizace dostupných dat k intenzitě dopravy na zájmovém území (RPDI, 2010, počet vozidel/24h) ilustrující problematiku konzistence, kontroly a interpolace dat.



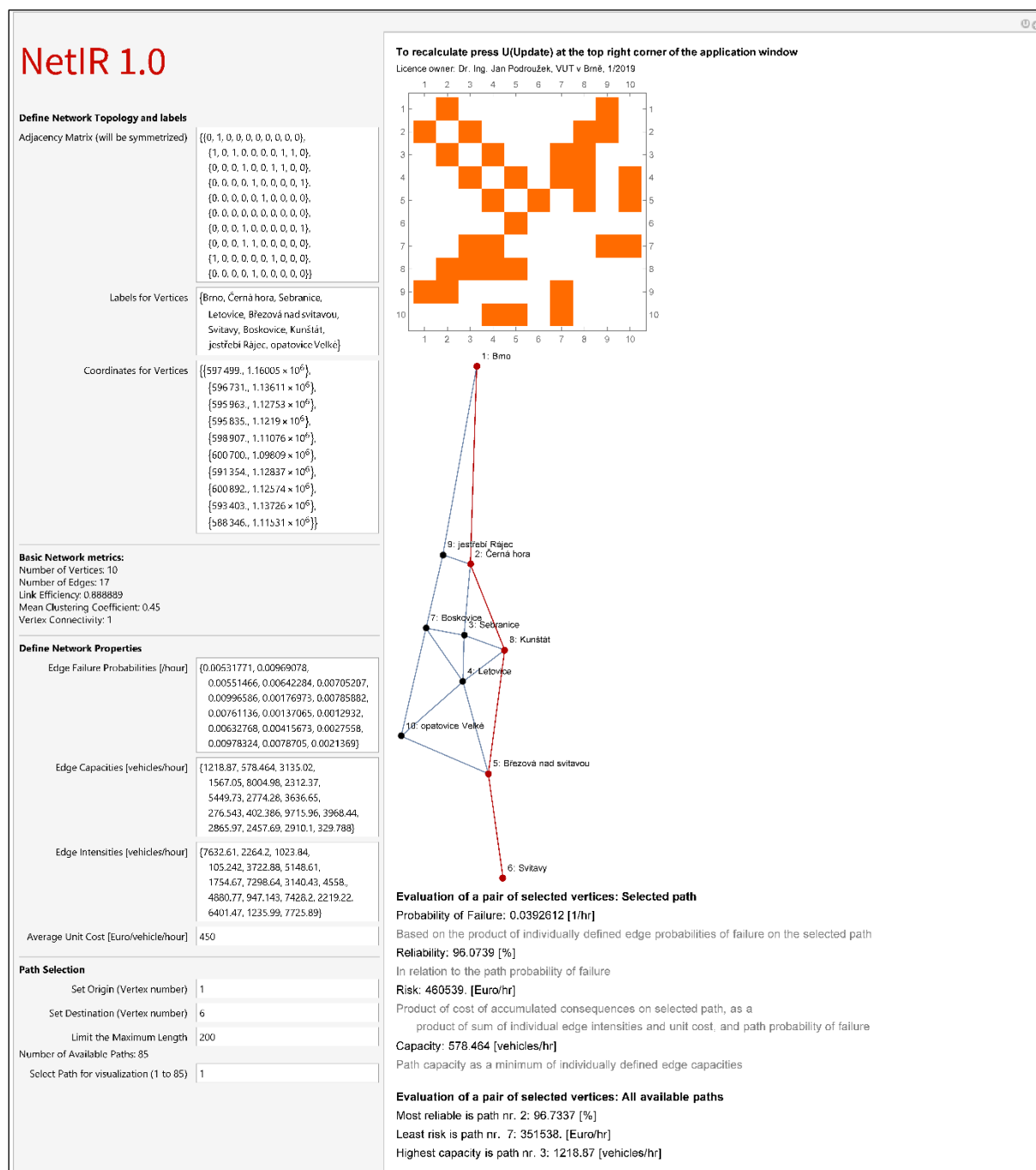
Obr. P2. Vizualizace celé silniční sítě (fialová barva) a úseků s dostupným sčítáním dopravy (černá barva s proměnlivou tloušťkou) na zájmovém území, kde došlo vlivem hypotetické povodně k uzavírce červeně zvýrazněného úseku (11 092 vozidel / 24 hod).



Obr. P3. Detail řešeného území s vizualizací dostupných podkladů k záplavovému územím (Q5, Q20, Q100, QMax) a červeně zvýrazněným odebraným úsekem.

6.3 PŘÍLOHA 3: ŘEŠENÍ MODELOVÉHO PŘÍKLADU

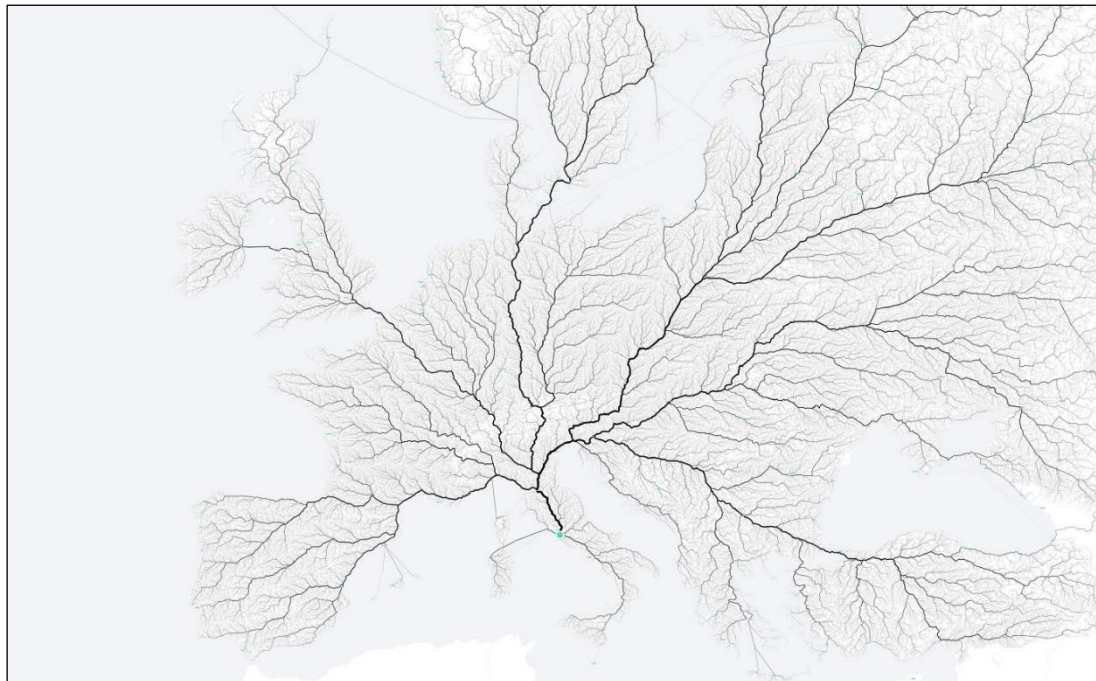
Na následující ukázce je uveden příklad, kde různé volby kritéria pro posouzení ideální trasy slouží k ilustraci problému nejednoznačnosti při snaze o identifikaci optimální trasy. Konkrétně trasa č. 2 představuje nejspolehlivější trasu, trasa č. 7 představuje nejméně rizikovou trasu a trasa č. 3 představuje trasu s největší kapacitou.



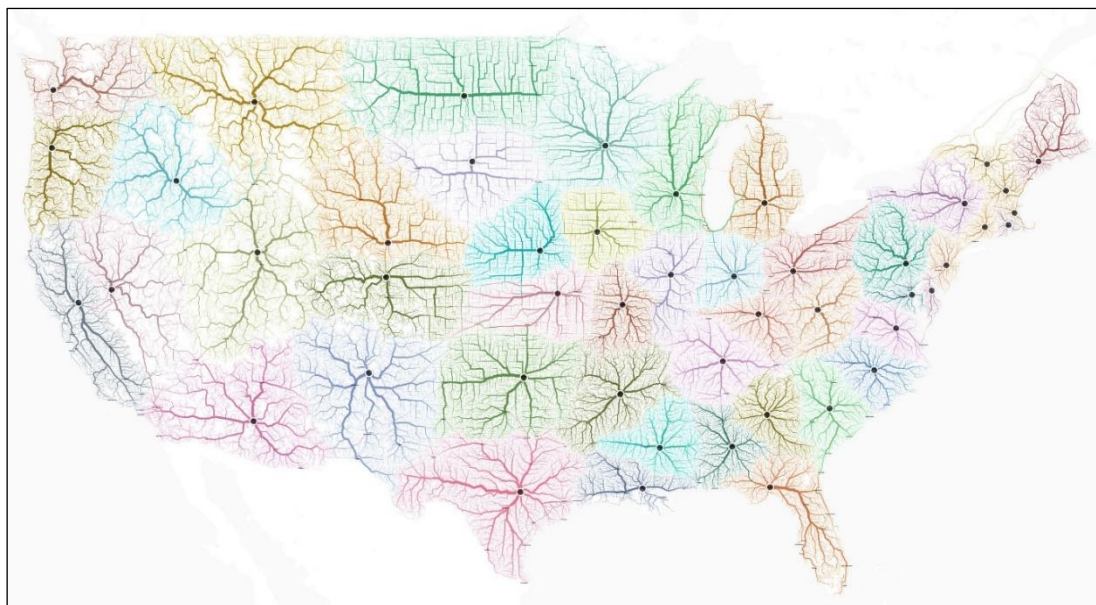
Obr. P4. Snímek pracovního prostředí prezentovaného softwarového nástroje NetIR 1.0.

6.4 PŘÍLOHA 4: PRESSKIT MOOVELLAB.COM

Následující vizualizace byly převzaty z <http://roadstorome.moovellab.com/> se svolením Moovellab teamu.



Obr. P4.1. „Všechny cesty vedou do Říma“: Automatická Identifikace páteřní sítě na základě vyhodnocení hustoty optimálních tras mezi Římem a všemi sídly ve viditelné oblasti.



Obr. P4.2. „Nová mapa Spojených Států“: Automatická Identifikace páteřních sítí na základě vyhodnocení nejkratších cestovních časů do hlavních měst USA. Lze rozpoznat různé topologie silniční sítě (pobřežní oblasti – vozovky jsou paralelní s pobřežím, středozápad – pravoúhlá síť, Skalnaté hory – zakřivená síť vozovek).



Obr. P4.3 „Nová mapa Evropy“: Automatická Identifikace páteřních sítí na základě vyhodnocení nejkratších cestovních časů do hlavních měst v Evropě. Je vidět, jak tento přístup překreslil mapu Evropy a jaké klade požadavky na některé důležité dopravní uzly. U malých států došlo k výraznému zvětšení (Andorra, Lichtenštejnsko, Vatikán a Monako) území a především u Německa, Švýcarska a Itálie došlo ke změnám jejich charakteristických tvarů.

6.5 PŘÍLOHA 5: ÚLOHA GIS PŘI ANALÝZE DOPRAVNÍCH SÍTÍ

6.5.1 Úvod do problematiky

Řešení dopravních úloh se vyznačuje výrazně interdisciplinárním charakterem. Podstatnou část podkladů v těchto úlohách tvoří geografická data a s tím souvisí i nutnost použití odpovídajících nástrojů pro jejich správu, analýzu a následnou prezentaci výsledků. Z těchto důvodů se v daném oboru ve značné míře uplatňují nástroje geografických informačních systémů (GIS). Speciální oblast GIS zaměřená na řešení dopravních úloh je označována zkratkou GIS-T (Geographic Information Systems for Transportation) (Rodrigue, 2017).

V dalším textu se zaměříme pouze na dílčí oblast možného využití GIS-T, a to analýzu dopravních sítí, která je předmětem předkládané metodiky. Vlastnímu nasazení technologií GIS-T musí předcházet jednoznačná definice cílů a návrh způsobu realizace projektu. Precizní návrh architektury GIS-T umožní v budoucnu úsporu vynaloženého úsilí, času a finančních prostředků. Nezbytné je zejména účelně definovat kritéria předpokládaných analýz a následně zajistit následující komponenty:

- data,
- metody zpracování a analýzy dat,
- programové prostředky (software),
- kvalifikovaný uživatel,
- technické prostředky (hardware).

Z výše uvedeného výčtu je patrné, že návrh architektury a vlastní realizace GIS-T vyžaduje zapojení a především vzájemnou spolupráci řady odborností.

Vstupní data pro účely analýz dopravních sítí je možné rozdělit z několika hledisek. Z hlediska původu můžeme rozlišit vstupní data:

- primární (data pocházející z prvotního sledování stavu, dějů a činností),
- sekundární (data převzatá).

Z pohledu obsahové náplně je možné provést rozdělení do tří základních skupin:

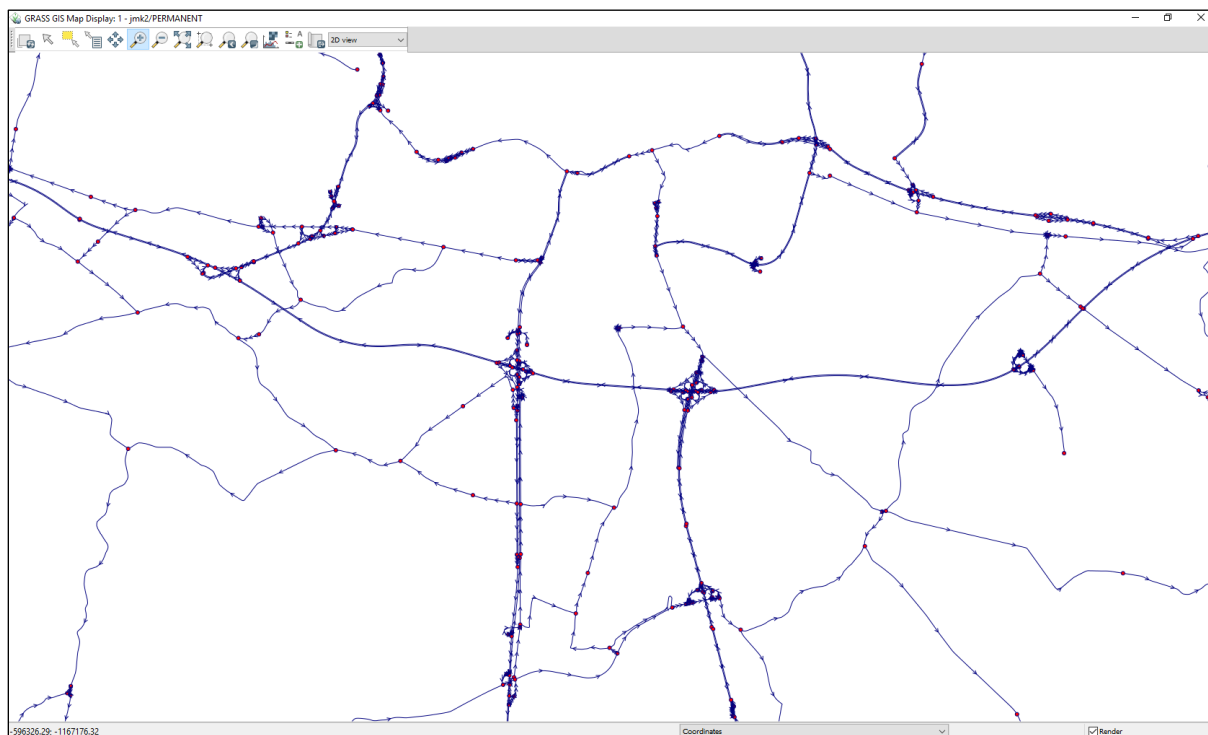
- topografická data,
- oborová data,
- metadata.

Topografická data poskytují informaci o geoprvcích vyskytujících se na zemském povrchu. Popisují reliéf zemského povrchu, vodstvo a antropogenní jevy (Rapant, 2001). Oborová data svým obsahem doplňují údaje v topografických datech o geometrická a popisná data pocházející z různých oborů lidské činnosti. Poslední nezbytnou součástí vstupních dat jsou metadata.

Uspořádání vstupních dat definuje tzv. datový model, který je abstrakcí reálného světa a zahrnuje pouze ty jeho vlastnosti, jež jsou významné pro zamýšlenou aplikaci. Datový model zpravidla definuje specifické třídy geoprvků, jejich atributy a vztahy mezi těmito třídami geoprvků (ÚVIS, 2001). Proces abstrakce objektů reálného světa do prostředí GIS označujeme jako datové

modelování, jehož výsledkem je datový model. Datové modelování představuje transformaci vybraných tříd objektů reálného světa na třídy geoprvků a definování jejich vzájemných vztahů. Zápis datových modelů se obvykle provádí ve formě diagramů s využitím syntaxe jazyka ULM (Unified Modelling Language), který graficky zachycuje hierarchickou strukturu a vzájemné vztahy geoprvků, popř. tříd geoprvků. Jazyk UML je tvořen grafickými symboly, které lze podle pevně daných pravidel navzájem kombinovat do podoby diagramů (Schmuller, 2001). Jedním z podstatných kritérií při návrhu struktury datových modelů je možnost snadného importu dat z různých informačních zdrojů. Jedná se např. o informační systémy státní správy, správců komunikací a vodních toků apod. Struktura musí být navržena tak, aby umožňovala převod dat s co možná nejmenšími nároky na jejich formální úpravu.

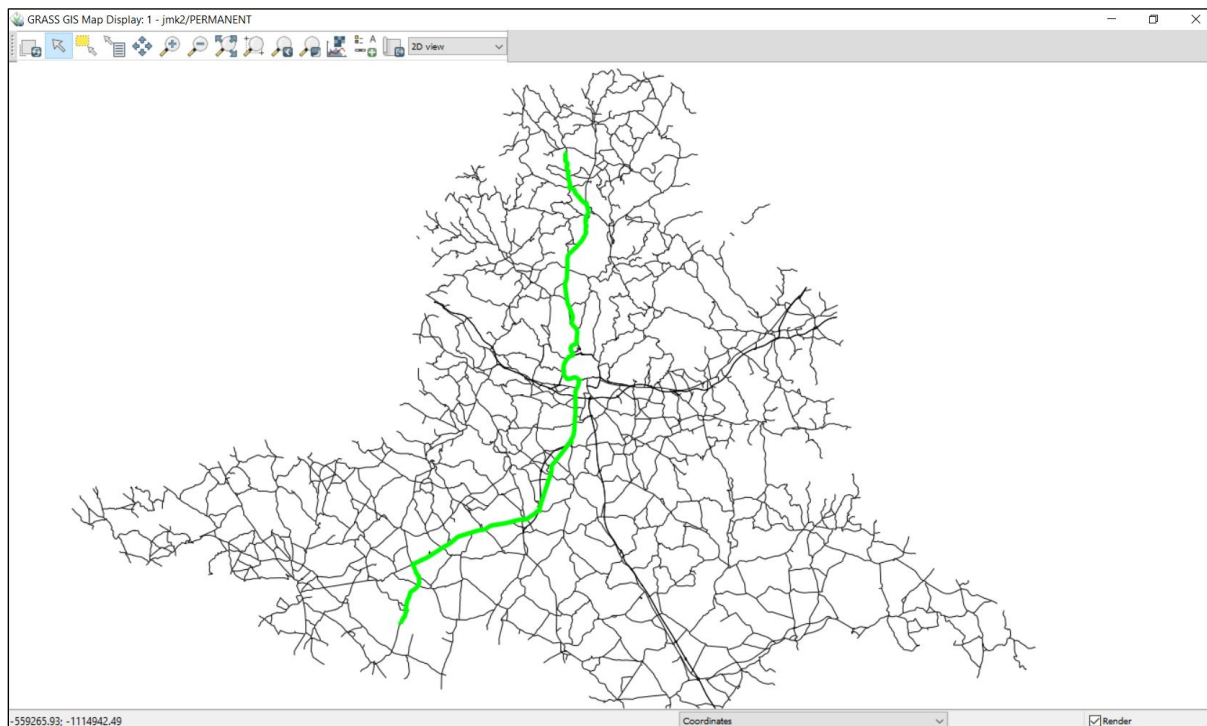
Abstrakce reálných složitých dopravních sítí do podoby datového modelu se opírá o teorii grafů, podrobněji popsanou v kap. 3. GIS patří v této souvislosti k nejefektivnějším nástrojům pro vytváření, ukládání a používání síťových datových modelů, které jsou implicitní součástí mnoha programových nástrojů. GIS programové nástroje zpravidla disponují vlastními datovými formáty pro ukládání dopravních sítí i nástroji pro jejich vytváření (viz Obr. P5.1). Použitý datový model musí umožňovat uložení všech nezbytných vlastností sítě, potřebných pro následné analýzy (viz kap. 3.2).



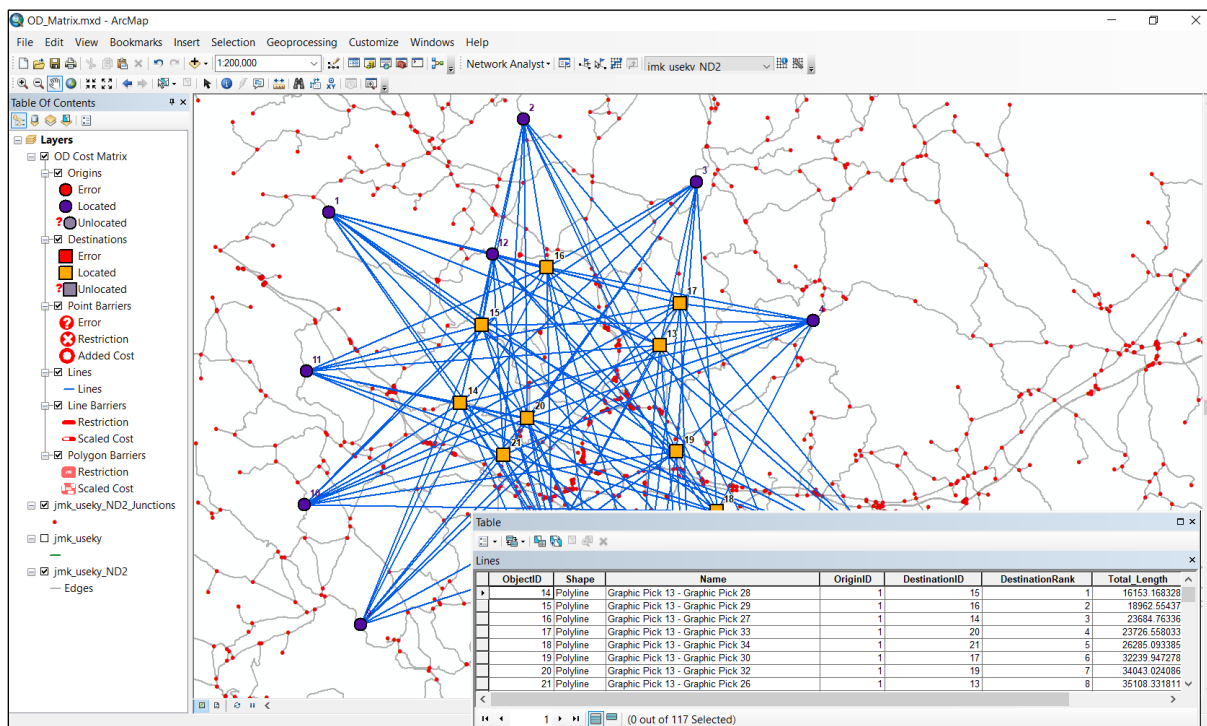
Obr. P5.1. Příklad silniční sítě vytvořené v programu GRASS GIS - patrné jsou uzly a úseky s vyznačenými směry.

Při tvorbě dopravní sítě je třeba věnovat značnou pozornost topologii vstupních dat, která definuje pravidla pro prostorové uspořádání uzlů a jejich spojení v síti. Zatímco teorie grafů je primárně zaměřena na schematizaci dopravních sítí, topologie síťového datového modelu by měla co nejlépe vystihovat reálné a prostorové funkční vztahy. Dalšími kroky v procesu tvorby sítě je zpravidla tzv. geokódování umožňující přesnou prostorovou lokalizaci adres na síti a lineární

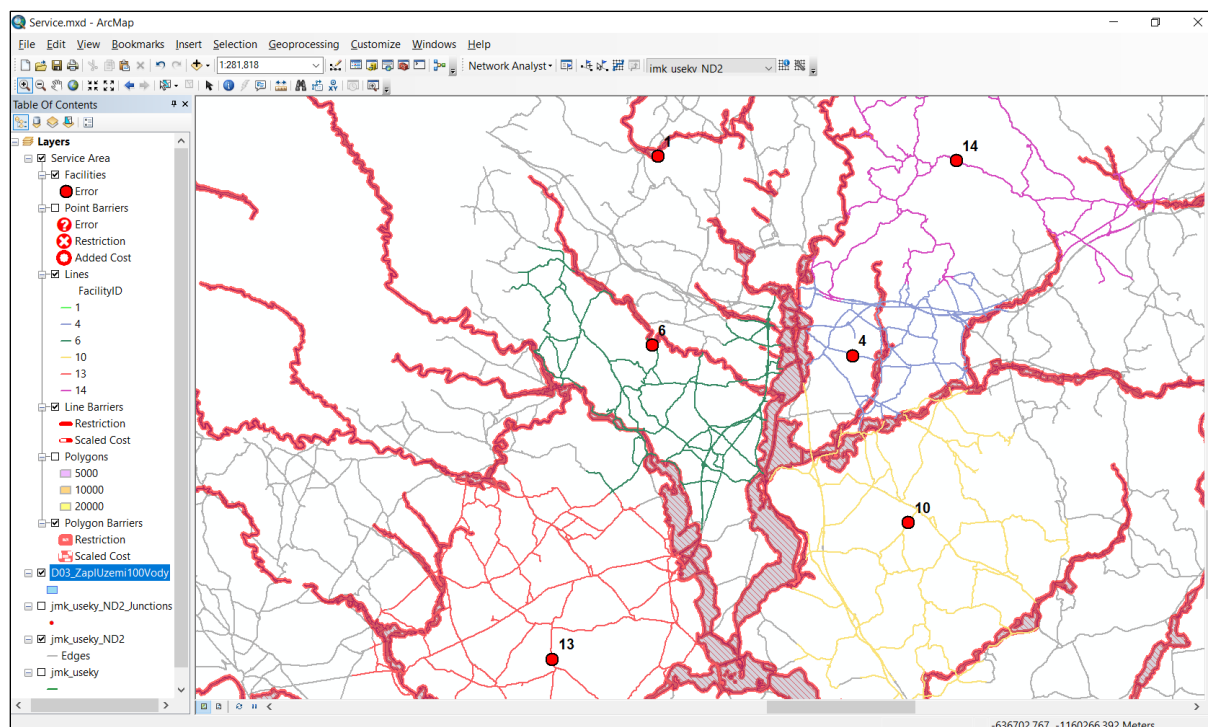
referencování, sloužící k lokalizaci jevů nebo vlastností jednotlivých úseků sítě na základě staničení.



Obr. P5.2. Příklad analýzy silniční sítě provedené v programu GRASS GIS - nalezení nejkratší vzdálenosti mezi dvěma body.



Obr. P5.3. Příklad analýzy silniční sítě provedené v programu ArcGIS s nadstavbou Network Analyst - vyhodnocení matice vzdáleností mezi zdrojovými a cílovými body.



Obr. P5.4. Příklad analýzy silniční sítě provedené v programu ArcGIS s nadstavbou Network Analyst - vyhodnocení obslužnosti území z vybraných bodů s dojezdovou vzdáleností do 10 km a zohledněním překážek v podobě záplavových území Q_{100} .

Pro analýzu dopravních sítí se využívají jednak standardní funkce GIS, jako jsou atributové a prostorové dotazy, geokódování, lineární referencování apod. Tyto funkce jsou využívány jak ve fázi přípravy vstupních dat, tak během analýz i následné prezentace výsledků. Analýza dopravních sítí však vyžaduje rovněž aplikaci specializovaných nástrojů, jejichž princip je popsán v kap. 4. Základní nástroje pro analýzu sítí jsou obsaženy jak v komerčních (např. ArcGIS s nadstavbou Network Analyst, GeoMedia, MapInfo), tak nekomerčních GIS programových prostředcích (např. GRASS GIS, QGIS). Jedná se především o hledání trasy dle zvolených kritérií, analýza obslužnosti území, výpočet matice nákladů, úloha obchodního cestujícího atd. (viz Obr. P5.2 až P5.4). V případě, že potřebné nástroje nejsou součástí GIS, je třeba zajistit vývoj nových účelových nástrojů nebo využít možnosti napojení GIS na jiné programové aplikace (např. Matlab, R atd.)

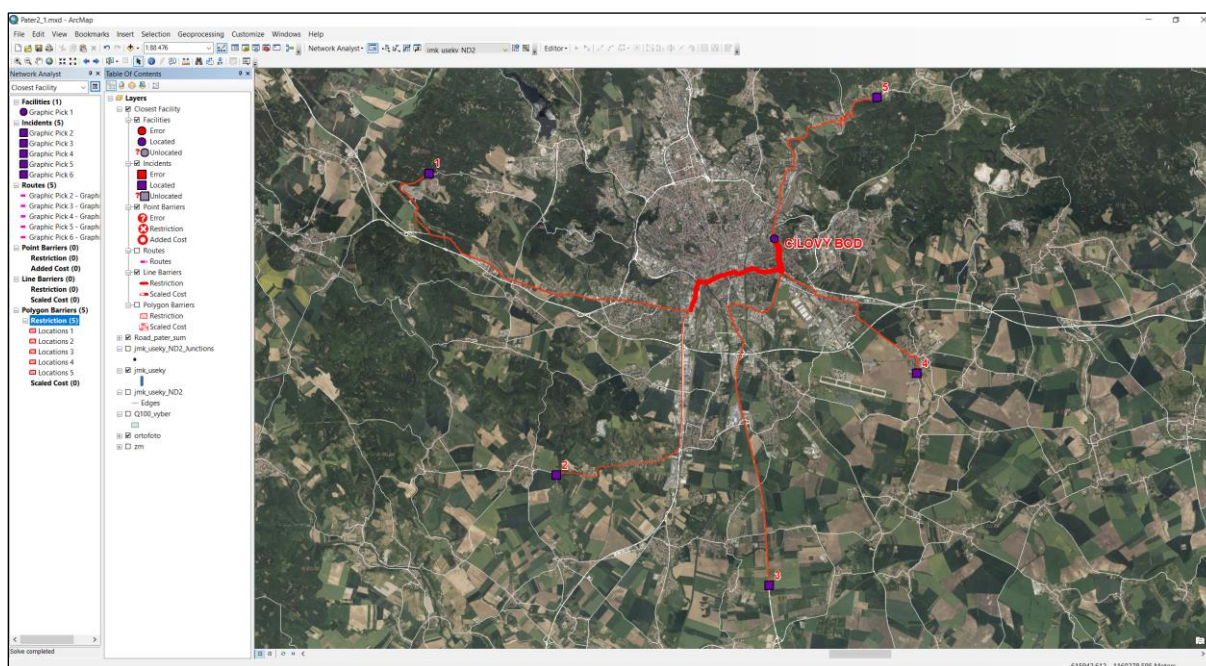
Z hlediska uživatelů GIS-T je nezbytné, aby se důkladně seznámili s používanými analytickými nástroji, aby je byli schopni efektivně využívat a korektně interpretovat výsledky. Tyto znalosti jsou rovněž podstatné pro hodnocení a následný výběr vhodných GIS programových prostředků. Naopak výzkumní pracovníci z oboru GIS-T mohou využít své znalosti, aby pomohli zlepšit analytické nástroje GIS-T.

6.5.2 Příklady analýz dopravních sítí

V následujících odstavcích jsou uvedeny ilustrativní příklady analýz dopravní sítě se zohledněním možných přerušení v důsledku výpadku vybraných úseků resp. uzlů. Jako vstupní podklad byla využita data silniční sítě Jihomoravského kraje a záplavová území stoleté povodně pro vybrané vodní toky. Jednotlivé analýzy sítě byly provedeny s použitím programového vybavení ArcGIS s nadstavbou Network Analyst a statistické výpočty pomocí programu R. Jako hardware bylo použito standartní PC s operačním systémem Windows 10, 8 jádrovým procesorem 3,2 GHz a 16 GB RAM.

6.5.3 Detekce páteřní sítě

Cílem analýzy byla v první fázi detekce páteřní sítě mezi 5 zdrojovými uzly a jedním uzlem cílovým. Postup analýzy je podrobněji popsán v kap. 4.2.1. Předmětem hodnocení bylo stanovení hustoty optimálních tras mezi zdrojovými uzly a uzlem cílovým. Na Obr. P5.5 jsou červenou barvou zakresleny zjištěné trasy a stanovená hustota odlišena tloušťkou čáry.



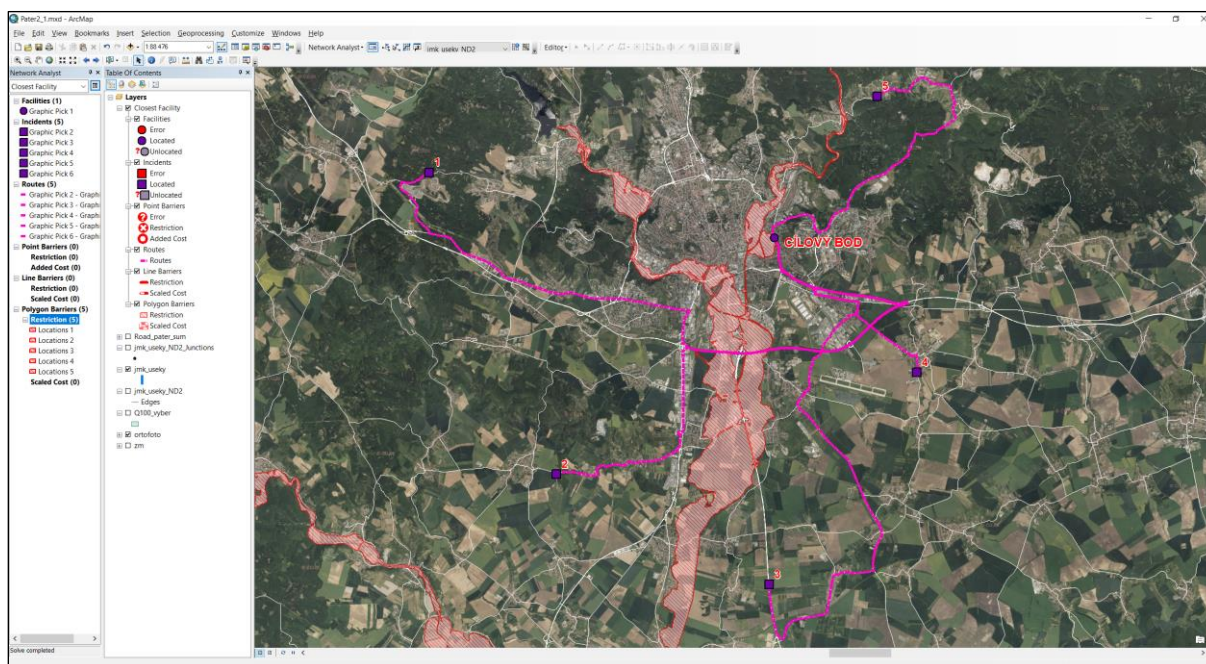
Obr. P5.5 Příklad detekce páteřní sítě na území města Brna

Tab. P5.1 Srovnání délek optimálních tras pro stav bez povodně a stav s výskytem stoleté povodně.

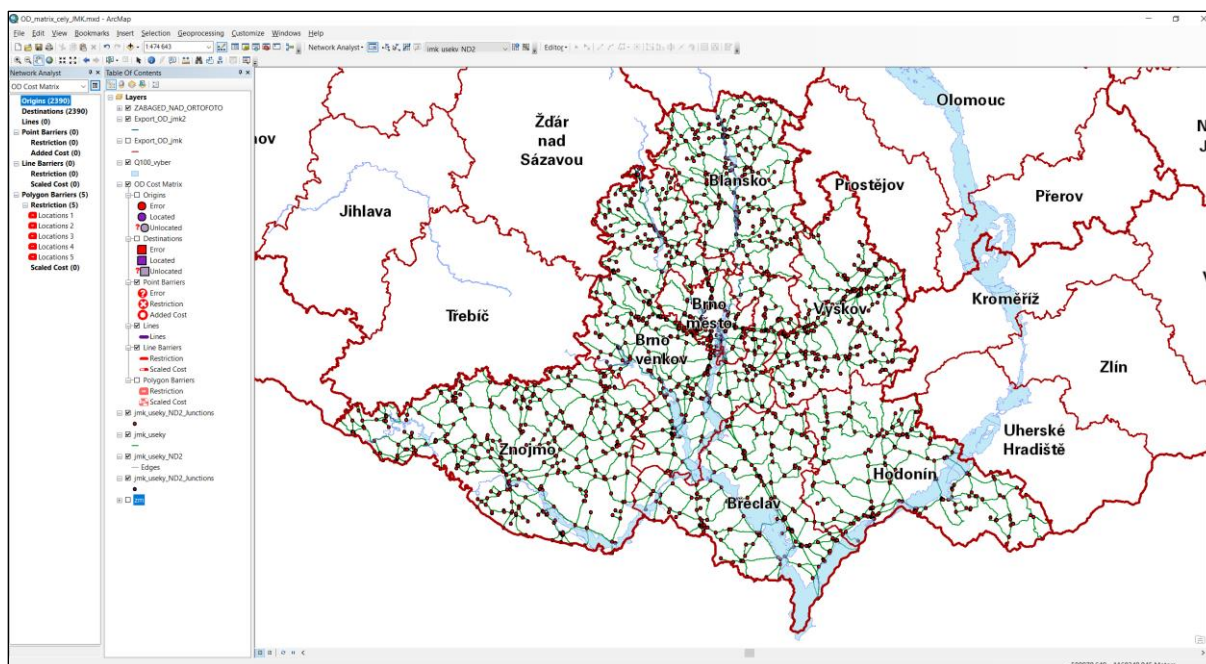
Číslo zdrojového bodu	Vzdálenost do cílového bodu mimo povodeň [km]	Vzdálenost do cílového bodu během povodně [km]	Rozdíl dojezdových vzdáleností [km]
1	20.9	32.5	+ 11.6
2	17.0	25.8	+ 8.8
3	16.0	25.5	+ 9.4

4	9.1	9.1	0.0
5	9.7	15.3	+ 5.6

V dalším kroku následovalo překrytí silniční sítě s rozlivy stoletých povodní na Svitavě a Svatce. Vlivem rozlivu během povodně došlo k přerušení páteřních úseků s největší hustotou a z Obr. P5.6 je patrná související změna průběhu optimálních tras ze zdrojových bodů do bodu cílového. V Tab. P5.1 je pak provedeno kvantitativní srovnání délky optimálních tras pro stav mimo povodeň a stav s výskytem povodně.



Obr. P5.6 Nalezení náhradních tras v případě přerušení páteřní sítě při stoletém povodňovém průtoku



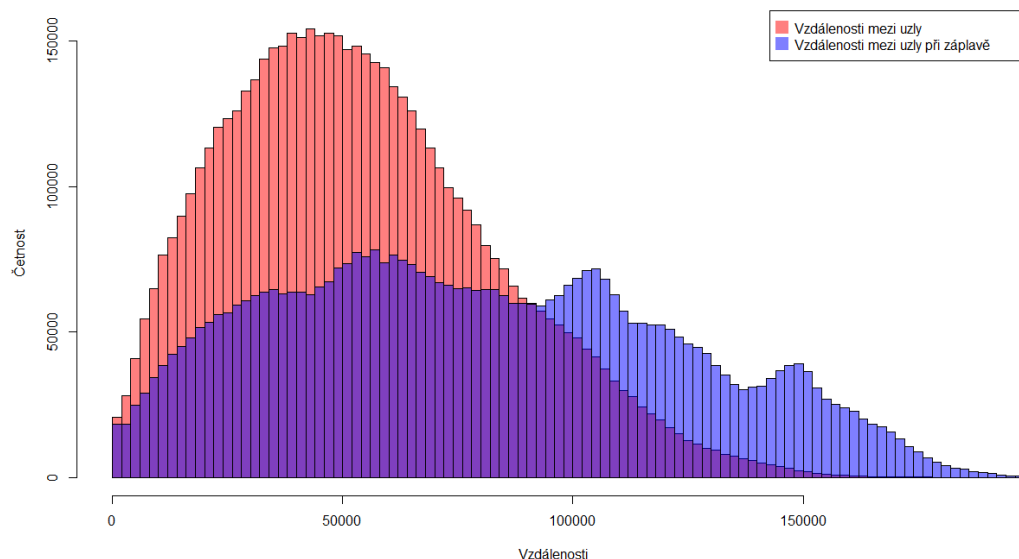
Obr. P5.7 Silniční síť pro území Jihomoravského kraje

6.5.4 Vyhodnocení matice vzdáleností

Výpočet matice vzdáleností byl proveden pro všechny uzly silniční sítě na celém území Jihomoravského kraje (viz Obr. P5.7). Analyzovaná síť sestávala z celkem 2390 uzlů, což představovalo vyhodnocení tras mezi cca 5 712 100 kombinacemi uzlů. Celková doba výpočtu byla únosná a nepřesáhla 8 min.

Pro srovnání byla dále vyhodnocena matice vzdáleností mezi všemi uzly sítě za předpokladu vyřazení některých úseků a uzlů sítě v důsledku zaplavení při stoletých povodňových průtocích na vodních tocích Svitava, Svratka, Morava, Jihlava a Dyje. Zaplavením došlo k přerušení úseků sítě zejména v místě mostních objektů křižujících vodní toky. Celková doba výpočtu matice byla srovnatelná s předchozí variantou bez uvažování povodně.

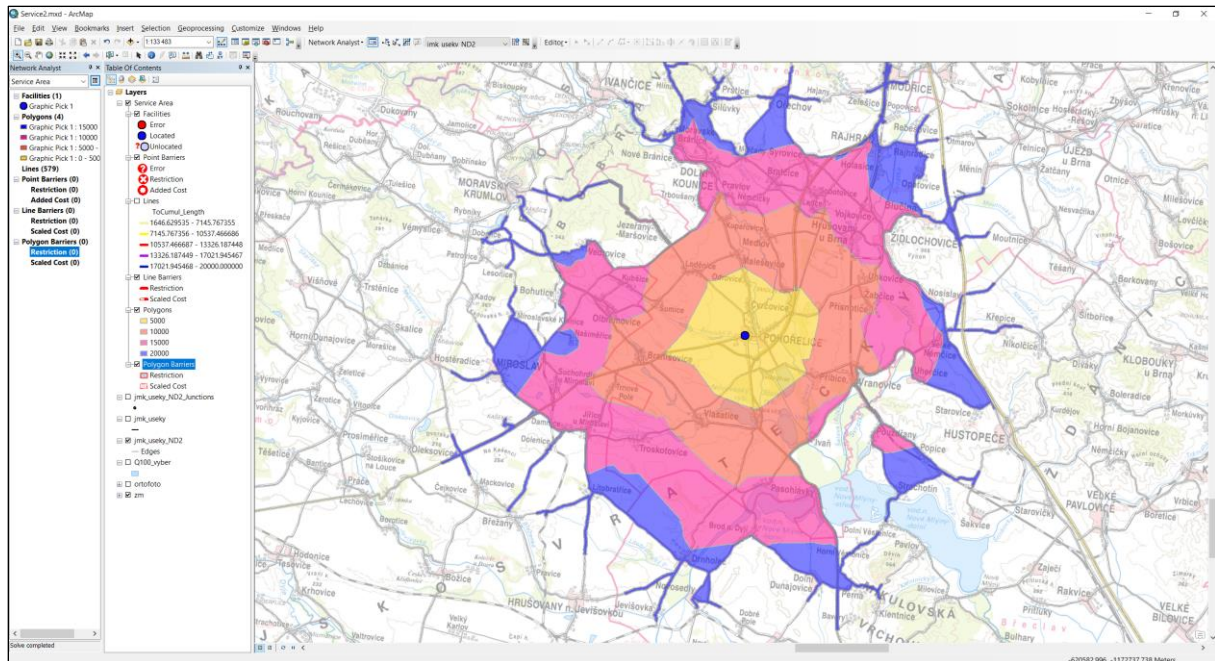
Vypočtené matice vzdáleností byly následně podrobeny statistické analýze s použitím programu R. Import dat do programu R byl proveden prostřednictvím textového souboru. Výsledky v podobě histogramů vzdáleností mezi uzly pro oba řešené stavy jsou doloženy na Obr. P5.8., ze kterého je dobře patrný nárůst četností u větších dojezdových vzdáleností během povodňové události. Vyřazení některých úseků a uzlů sítě vlivem zaplavení se projevilo rovněž zvýšením střední hodnoty dojezdových vzdáleností z 54,3 km na 79,6 km.



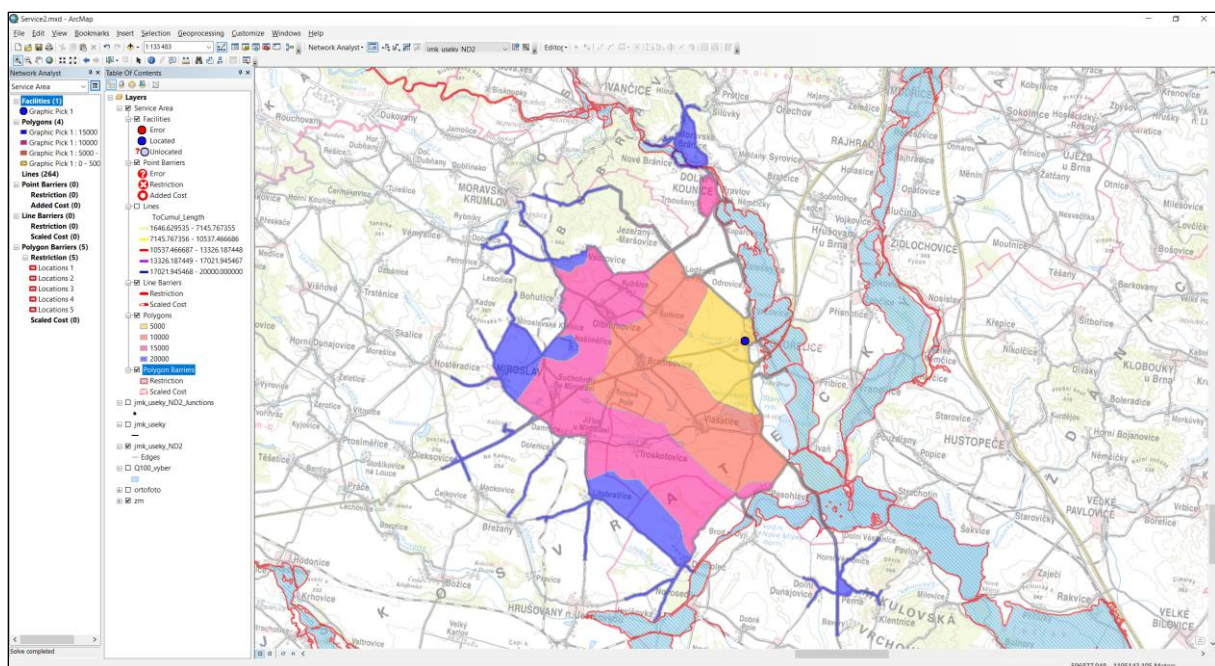
Obr. P5.8 Histogramy vzdáleností mezi uzly sítě pro stav bez povodně a během stoleté povodně.

6.5.5 Vyhodnocení obslužné oblasti

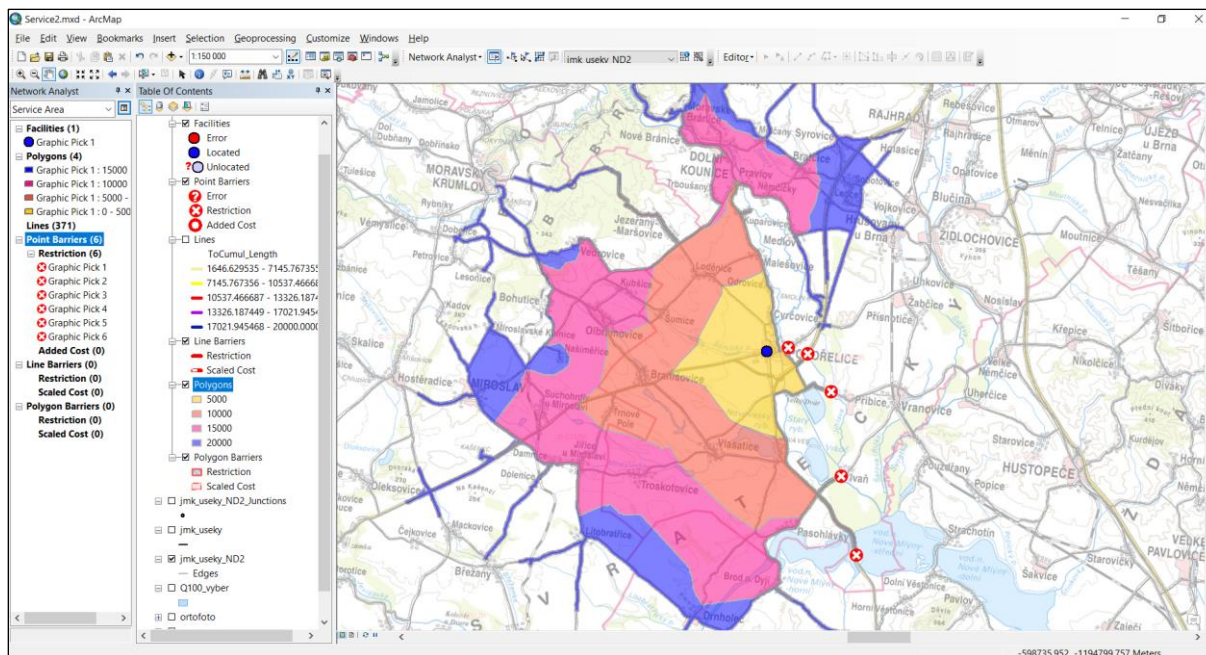
Cílem praktické aplikace bylo posouzení vlivu přerušení vybraných úseků sítě na zajištění obslužnosti přilehlého území ze zvoleného výjezdního bodu. Vyhodnocovány byly dojezdové vzdálenosti 5 km, 10 km, 15 km a 20 km. Výsledky pro stav s plně funkční sítí jsou uvedeny na Obr. P5.9. Z následujícího Obr. P5.10 je patrné zásadní zmenšení obslužné oblasti vlivem vyřazení vybraných úseků a uzlů sítě v důsledku zaplavení během stoleté povodně. Na Obr. P5.11 je pak uveden výsledek obdobné simulace, při které byla obslužnost území snížena zadáním neprůjezdnosti u 5 zvolených mostů.



Obr. P5.9 Obslužné oblasti pro dojezdové vzdálenosti 5, 10, 15 a 20 km od zvoleného výjezdního bodu.



Obr. P5.10 Zmenšení obslužné oblasti vlivem záplavy při stoleté povodni.



Obr. P5.11 Zmenšení obslužné oblasti v důsledku neprůjezdnosti 5 zvolených mostů.

6.5.6 Použitá literatura

- 1 ÚVIS. 2001. Terminologický výkladový slovník pojmů z oblasti geoinformací. Věstník Úřadu pro veřejné informační systémy, ročník II, částka 3. Praha.
- 2 Schmuller, J. 2001. Myslíme v jazyku UML, Grada, Praha.
- 3 Rodrigue, J. P. (2017) The Geography of Transport Systems, fourth edition. New York: Routledge, 440 pages. ISBN 978-1138669574
- 4 Rapant, P. 2001. Pracovní návrh první části výkladového slovníku pro oblast geoinformatiky, časopis Geoinfo 2/2001.

7 SEZNAM PUBLIKACÍ, KTERÉ PŘEDCHÁZELY METODICE

- [1] REHAK, D. (40), HROMADA, M. (40), NOVOTNÝ, P. (20), European Critical infrastructure risk and safety management: Directive implementation in practice, In Chemical Engineering Transactions, Volume 48, 2016, Pages 943-948, ISSN: 22839216.
- [2] NOVOTNÝ, Petr, MARKUCI, Jiří, ŘEHÁK, David, ALMARZOUQI, Ibrahim, JANUŠOVÁ, Lucia. Critical Infrastructure Designation in European Union Countries: Systems Approach Implementation. Communications – Scientific Letters of the University of Žilina, 2016, Vol. 18, No. 2, pp. 163-169. ISSN 1335-4205.
- [3] NOVOTNÝ, Petr, MARKUCI, Jiří, TITKO, Michal, SLIVKOVÁ, Simona, ŘEHÁK, David. Practical Application of a Model for Assessing the Criticality of Railway Infrastructure Elements. Transactions of the VŠB - Technical University of Ostrava, Safety Engineering Series, 2015, Vol. 10, No. 2, pp. 26-32. ISSN 1801-1764.
- [4] FUCHS, P., KRAUS, J., Resilience Parameters for Critical Infrastructure Protection. Proceedings of 20th International Scientific Conference. Transport Means. 2016. 804-808. ISSN 2351-7034
- [5] LEITNER, B., LUSKOVÁ, M., DVORAK, Z., SVENTEKOVA, E. Fatigue Damage Prediction as a Part of Technical Systems Reliability Assessment. Key Engineering Materials, 2017, Vol. 755, pp. 131-138. ISSN 1013-9826. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.755.131
- [6] ŘEHÁK, David, ŠENOVSKÝ, Pavel, HROMADA, Martin, LOVEČEK, Tomáš, NOVOTNÝ, Petr. Cascading Impact Assessment in a Critical Infrastructure System. International Journal of Critical Infrastructure Protection, 2018, Vol. 22, pp. 125-138. ISSN 1874-5482. DOI: 10.1016/j.ijcip.2018.06.004
- [7] APELTAUER, T.; APELTAUER, J.; OKŘINOVÁ, P.; DUFEK, Z. Aktuální trendy v oblasti odelování pohybu osob ve vazbě na ochranu měkkých cílů a hromadnou dopravu. In Veřejný prostor - návrh, obnova, využití a revitalizace, včetně dopravně inženýrských opatření. Mikulov: 2018. s. 62-69. ISBN: 978-80-270-3445-1.
- [8] APELTAUER, T.; APELTAUER, J.; OKŘINOVÁ, P.; DUFEK, Z. Využití simulačních nástrojů při ochraně měkkých cílů dopravní infrastruktury. Litomyšl: Agentura VIACO, 2018. s. 107-112.
- [9] ŘEHÁK, D., HROMADA, M., ŠENOVSKÝ, P., KROČOVÁ, Š., APELTAUER, T., & PIDHANIUK, L. Souhrn způsobů hodnocení kvality a odolnosti infrastruktury - Závěrečná zpráva k veřejné zakázce Úřadu vlády ČR. Fakulta bezpečnostního inženýrství, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2016.