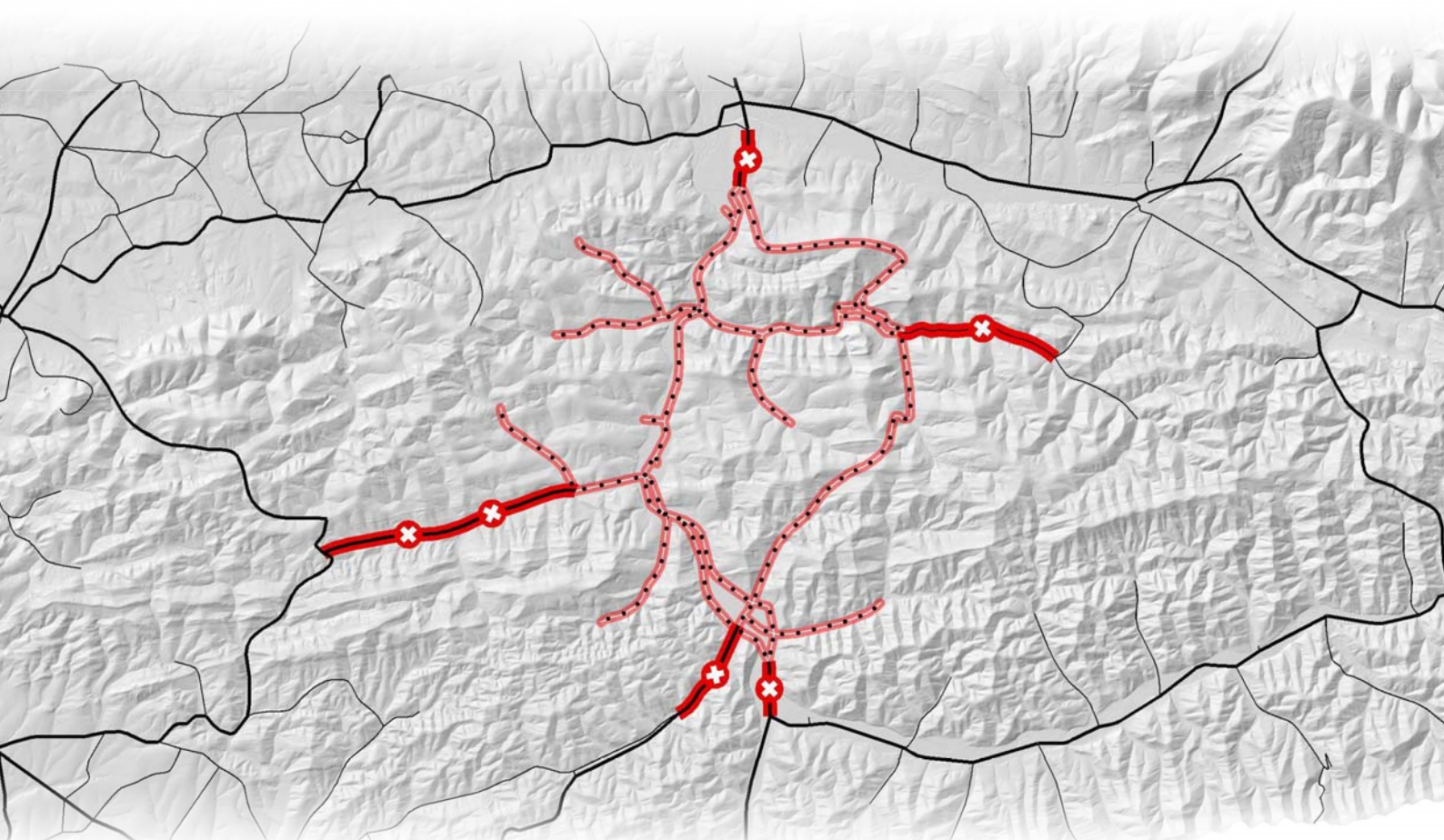


Online identifikace kritických úseků pozemních komunikací pomocí síťových analýz

METODIKA



Michal Bíl a kolektiv

Online identifikace kritických úseků pozemních komunikací pomocí síťových analýz

Metodika

Michal Bíl, Rostislav Vodák, Jan Kubeček, Tomáš Svoboda, Richard Andrášik,
Jiří Sedoník, Zuzana Křivánková, Martina Bílová



MINISTERSTVO VNITRA
ČESKÉ REPUBLIKY



Ministerstvo dopravy

Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.

2015

Výstup řešení projektu: Metodika je výsledkem řešení projektu Bezpečnostního výzkumu Ministerstva vnitra ČR „Kvantifikace rizika ohrožení dopravní infrastruktury České republiky přírodními hazardy“, č. VG20102015057.

Zpracovatel: Centrum dopravního výzkumu, v. v. i. (CDV)

Autoři **RNDr. Michal Bíl, Ph.D., RNDr. Rostislav Vodák, Ph.D., Mgr. Jiří Sedoník, Mgr. Jan Kubeček, Mgr. Tomáš Svoboda, Mgr. Richard Andrášik, Mgr. Zuzana Křivánková, Mgr. Martina Bílová**

Oponovali: **doc. Ing. Pavel Hruběš, Ph.D.**
ČVUT v Praze, Fakulta dopravní, Ústav dopravní telematiky
email: hrubes@fd.cvut.cz
Mgr. Jan Kufner
Central European Data Agency, a. s.
email: kufner@ceda.cz

Metodika certifikována: 21. 9. 2015

Certifikoval: Odbor ITS, kosmických aktivit a VaVal, Ministerstvo dopravy ČR

ISBN: 978-80-88074-18-2

Obsah

Předmluva	4
Cíl metodiky.....	5
Terminologie	6
Definice grafu a související pojmy	6
Zranitelnost	10
Zranitelnost silničních sítí	10
Dopady přerušení úseků.....	10
Události na síti	14
Metody identifikace nejslabších úseků v síti.....	17
Objízdne trasy přerušených úseků	17
Statické a dynamické scénáře	21
Rychlost výpočtu	21
Aplikace účelových funkcí	21
Základní algoritmy	23
Kružnicový algoritmus	23
Stochastický algoritmus.....	25
Případová studie – Zlínský kraj.....	27
Ukázky aplikací navržených metod na příkladu Zlínského kraje	29
Návrh toku dat a implementace prezentovaných algoritmů	33
Návrh webové mapové aplikace pro sledování kritických stavů	35
Význam výsledků pro praxi.....	40
Závěr	41
Srovnání novosti postupů uvedených v metodice	42
Popis uplatnění metodiky.....	44
Ekonomické aspekty metodiky.....	45
Literatura	46
Seznam publikací autorského týmu, které předcházely metodice	48

Předmluva

Silniční infrastruktura patří mezi nejdůležitější objekty, které lidstvo vytvořilo. Bez ní by nebylo možné přepravovat různé druhy zboží včetně základních potravin a poskytovat základní služby, jako jsou například služby zdravotní. Na silniční infrastrukturu tedy stojí celá ekonomika lidské společnosti a bez ní bychom určitě nebyli jako lidstvo tam, kde se nacházíme nyní. Proto musí být naším prvořadým úkolem udržet silniční síť ve funkčním stavu, tj. ve stavu, kde každé místo v síti je dostupné z jiného místa.

Tato metodika si tedy klade za cíl vyplnit prázdné místo v existujícím systému sběru, analýz a vizualizace dopravních dat. Zatímco metody sběru a vizualizace dat jsou poměrně dobře propracovány a celý systém funguje na rozumné úrovni, metody analýz evidovaných dat zdaleka tak propracované nejsou. Důvodem pro tuto skutečnost jsou jednak poměrně různorodé požadavky, které mohou mít správci silniční sítě, a jednak v případě mnoha analýz vysoké výpočetní nároky. Právě této problematice se Centrum dopravního výzkumu, v. v. i. věnovalo v rámci projektu TRISK, kde vyvinulo několik nových postupů, které mohou být použity pro předpověď a analýzu všech možných rizik v dopravním síťovém systému. Tyto postupy jsou založeny na simulacích rozpadů silniční sítě a jejich analýze. Postupy, které mohou najít uplatnění v krizovém řízení, jsou uvedeny dále v tomto textu, kde je podrobněji rozebereme a zmíníme možnosti jejich použití a zabudování do stávající inforatické struktury.

Tato metodika využívá výsledků, které byly dříve publikovány ve spolupráci s našimi kolegy z Centra dopravního výzkumu, v. v. i. a s pracovníky dalších institucí. Jmenovitě bychom chtěli poděkovat panu Prof. RNDr. Petru Hliněnému, Ph.D. z Fakulty informatiky MU za inspiraci při vývoji deterministického algoritmu a RNDr. Tomáši Rebokovi, Ph.D. z CERIT za umožnění přístupu k hardware, na němž probíhala naprostá většina výpočtů.

Metodika je rozdělena na několik částí. V první části metodiky jsou uvedeny základní pojmy z teorie grafů, které se používají při počítačovém zpracování a analýze silničních sítí. Dále je definován pojem zranitelnosti a postupy jejího hodnocení. V navazující části práce jsou představeny algoritmy, které slouží k identifikaci nejslabších úseků (hran) v síti, případně jejich kombinací. Ukázány jsou jak deterministický tak stochastický algoritmus a dále jsou rozebrány jejich výhody a nevýhody. V poslední kapitole je ukázána aplikace obou algoritmů na konkrétní silniční síť Zlínského kraje. Na závěr jsou podrobně rozebírány návrhy implementace algoritmů do systému JSDI.

Cíl metodiky

Metodika zpracovává do přehledné podoby výsledky projektu TRISK, zejména pak jeho části věnující se metodám zranitelnosti sítí s naznačenými aplikacemi do *Jednotného systému dopravních informací (JSDI)*. Věříme, že metodiku využijí zájemci o plánování dopravních sítí a též zájemci věnující se problematice hodnocení potenciálních dopadů ať přírodních nebo umělých pohrom. S ohledem na novost a efektivnost uváděných metod, a to i v celosvětovém měřítku, jsme přesvědčeni, že jejich zabudování do JSDI by posunulo Českou republiku mezi státy s nejlepšími analytickými nástroji v oblasti řízení rizik na silničních sítích.

Terminologie

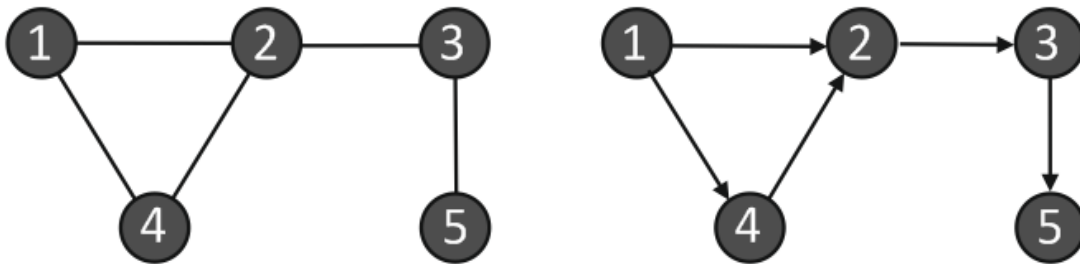
Jak už bylo uvedeno v předchozí kapitole, pro počítačovou analýzu silničních sítí je nutné se podívat do teorie grafů, která jednak umožní efektivní počítačovou reprezentaci silniční sítě, a také obsahuje vhodné nástroje pro jejich analýzy. Dále se zaměříme na pojem zranitelnosti sítě, který není dosud zcela jednoznačně definován. Z tohoto důvodu uvedeme takovou definici, která je podle našeho názoru logická. Nyní se tedy seznámíme se základními pojmy.

Definice grafu a související pojmy

V této kapitole představíme základní pojmy z teorie grafů, které slouží pro reprezentaci a analýzu silniční sítě.

Orientovaný a neorientovaný graf

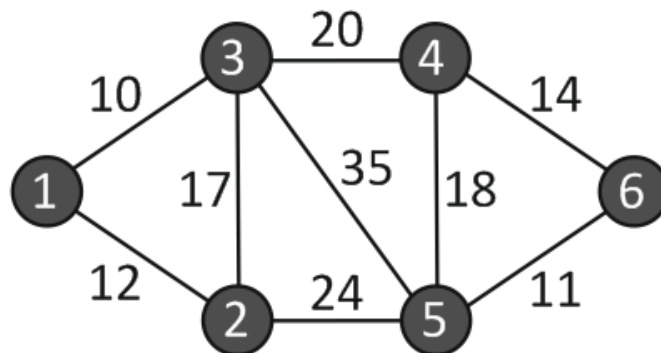
Grafem G rozumíme uspořádanou dvojici $(V; E)$ (tj. $G = (V; E)$), kde V je množina *uzlů* (vrcholů), a E je množina *hran*. Každá *hrana* je definovaná pomocí dvojice koncových uzlů. Grafy můžeme rozlišit na orientované a neorientované (Obr. 1). U orientovaných grafů je každá hrana zapsána jako uspořádaná dvojice čísel (u, v) , kdy tento zápis v sobě nese informaci, že hrana je průjezdná jen z uzlu u do uzlu v a nikoli obráceně. V reálném světě tento stav odpovídá jednosměrné silnici. U neorientovaných grafů je každá hrana zapsána jako množina $\{u, v\}$, a tento zápis znamená, že je hrana průjezdná v obou směrech. Je zřejmé, že každý neorientovaný graf lze zapsat jako orientovaný tak, že hranu $\{u, v\}$ lze nahradit dvěma hranami (u, v) a (v, u) .



Obr. 1: Neorientovaný a orientovaný graf

Ohodnocený graf

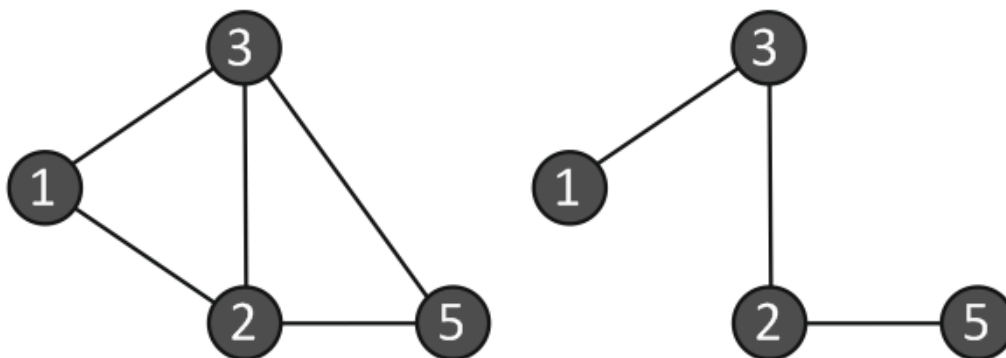
Při práci s reálnými sítěmi máme často k dispozici další informace. Mezi nejvýznamnější patří informace týkající se hran nebo uzlů. V případě silniční sítě většinou známe informace o počtu obyvatel, kteří v daném uzlu žijí a o délkách respektive dobách projetí jednotlivých hran. Tyto informace nám umožňují reprezentovat danou silniční síť pomocí tak zvaného *ohodnoceného grafu*, ve kterém jsou informace o uzlech a hranách zajištěny pomocí funkcí, které jednotlivým uzlům a hranám přiřadí příslušnou informaci.



Obr. 2: Hranově ohodnocený graf

Podgraf

Při reálných aplikacích se většinou nepracuje s celou sítí, jinými slovy s celým grafem, ale jen s jeho částí. Z tohoto důvodu zavádíme pojem *podgrafu*. *Podgrafem* P grafu G rozumíme libovolný takový graf, pro který platí, že množina jeho uzlů $V(P)$ je podmnožinou $V(G)$ a množina jeho hran $E(P)$ je podmnožinou $E(G)$. Na následujícím obrázku vidíme příklady podgrafu grafu z Obr. 2. *Indukovaný podgraf* (Obr. 3, vlevo) je speciálním případem podgrafu, kdy jsou z původního grafu vynechány některé uzly a všechny hrany, které do nich vedou. Obecně lze v podgrafu (Obr. 3, vpravo) vynechat navíc i další hrany.



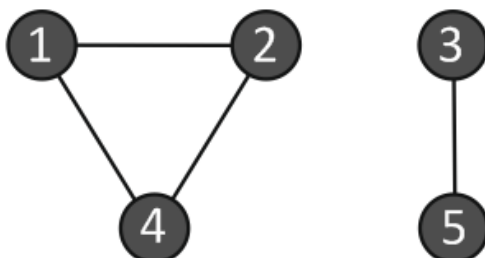
Obr. 3: Indukovaný podgraf a podgraf

Souvislost grafu, komponenty

Jestliže graf reprezentuje nějakou síť, a to nejen silniční, je jednou ze základních otázek, zda máme možnost dostat se z každého uzlu grafu do jeho libovolného jiného uzlu. Pokud tomu tak je, příslušný graf se nazývá *souvislý*. V opačném případě mluvíme o *nesouvislém grafu*. Je zřejmé, že nesouvislý graf se skládá z více souvislých částí, které nazýváme *komponenty* (Obr. 4). *Komponenta* grafu je tedy taková množina uzlů, že

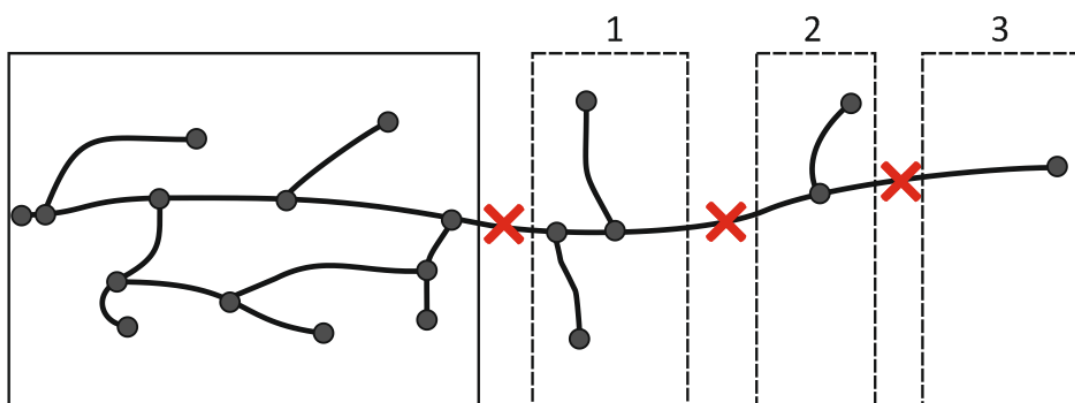
- existuje vždy nejméně jedna cesta z každého uzlu této množiny do všech ostatních uzlů této množiny
- nelze přidat další uzel grafu tak, aby byla dodržena první vlastnost.

Na následujícím obrázku vidíme příklady komponent.



Obr. 4: Graf se dvěma komponentami souvislosti

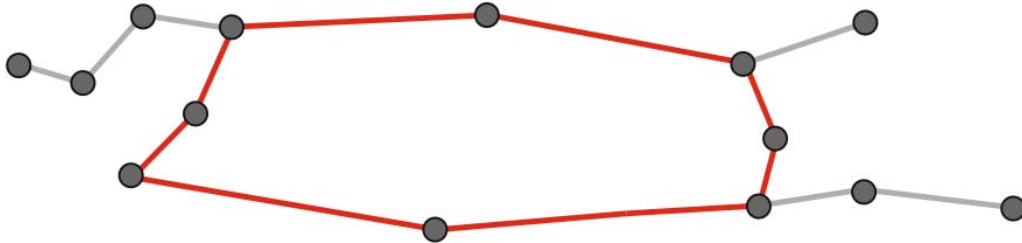
Pokud v grafu existuje více komponent, které mohly vzniknout například jako důsledek nějaké přírodní katastrofy, je důležité si uvědomit, že ne všechny komponenty jsou rovnocenné pro následné napojení zpět do souvislého celku (viz. Obr. 5).



Obr. 5: Zatímco termín komponenta je v souvislosti s grafy dobře znám, v realitě se můžeme setkat s komponentami, které nejsou v hierarchii dostupnosti na stejné úrovni. Je zřejmé, že zpřístupnění komponenty 1 vyžaduje opravu pouze jednoho úseku. Bez tohoto úseku se však nelze dostat ke komponentě 2 a 3.

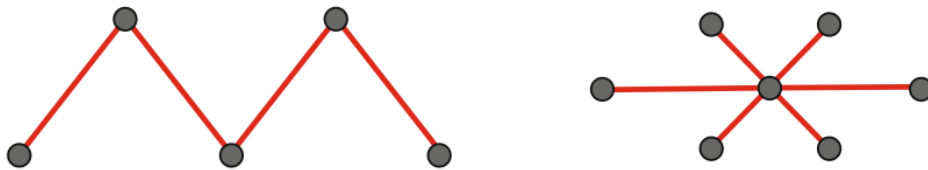
Kružnice, kostra a řez grafu

Mezi další důležité pojmy patří *kružnice* v grafu. *Kružnicí* (cyklem) v grafu rozumíme posloupnost uzlů a hran $(v_0, e_1, v_1, \dots, e_t, v_t = v_0)$, kde uzly v_0, \dots, v_{t-1} jsou navzájem různé uzly grafu G a pro každé $i = 1, 2, \dots, t$ je $e_i = \{v_{i-1}, v_i\}$ prvkem $E(G)$. Příklad kružnice můžeme vidět na následujícím obrázku 6.



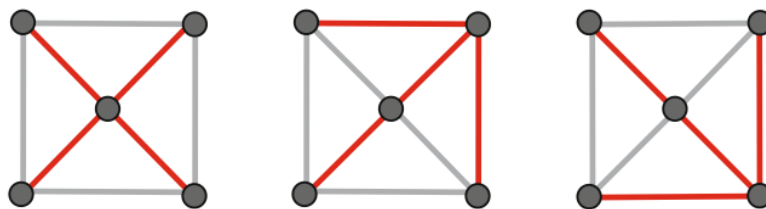
Obr. 6: Příklad kružnice v obecném grafu.

Pomocí kružnice v grafu můžeme definovat *strom* a *kostru*. *Strom* je souvislý graf neobsahující kružnici (viz následující obrázek 7).



Obr. 7: Příklad stromu

Libovolný strom (V, E') , kde E' je podmnožinou E , nazveme *kostrou* grafu (Obr. 8).



Obr. 8: Kostra grafu

Nechť $G = (V, E)$ je graf, R je podmnožina V a $R^c = V \setminus R$ je komplement R . *Řezem* určeným množinou R je množina hran, jejichž jeden koncový uzel leží v množině R a druhý v R^c . *Minimální řez* je taková minimální množina hran, jejichž odstraněním se graf stane nesouvislý.

Zranitelnost

V současné světové literatuře existují minimálně dva paralelně používané pojmy vztahující se ke *zranitelnosti* silničních sítí. U prvního z nich se identifikují v síti takové kombinace neprůjezdných úseků, které mají na síť největší dopad. U druhého z nich se navíc odhaduje pravděpodobnost, že příslušné úseky budou neprůjezdné. Tato dodatečná informace se pak zahrnuje do celkového hodnocení dopadů na silniční síť.

Je patrné, že u obou definic je nutné mít k dispozici vhodnou účelovou funkci, která je schopna měřit dopady jednotlivých událostí. Tato účelová funkce v sobě většinou zahrnuje informace, které jsou pro správce sítě důležité. Typickým příkladem účelové funkce je funkce, která vyjadřuje finanční dopady jednotlivých událostí. Výsledkem pak mohou být například cenové mapy, které přehledně zobrazují náklady na výstavbu a opravu. Dalším typickým příkladem účelové funkce je funkce, která v sobě zahrnuje informaci o počtu obyvatel odříznutých od zdrojů potravin a základních služeb. Tato informace pak pomáhá při záchranných pracích a při rekonstrukci poškozených úseků.

V této metodice budeme používat první definici zranitelnosti. Důvodem, proč v metodice pracujeme jen s první definicí zranitelnosti, je, že chceme analyzovat všechny situace a tedy i ty, které mají nižší pravděpodobnost výskytu, protože často právě tyto události mají daleko větší dopad na síť než ty více pravděpodobné, a není tedy možné je ignorovat (případně bagatelizovat) jen na základě nepravděpodobnosti jejich vzniku. Jako příklady můžeme uvést následky zemětřesení v Japonsku v roce 2011 a vážné poškození tlakových nádob reaktorů jaderné elektrárny Fukušima. Navíc se v minulosti již mnohokrát ukázalo, že nastaly scénáře, které se z pohledu předem vypočtené pravděpodobnosti prakticky neměly vůbec objevit. Chyba je v takových případech vždy na straně špatného odhadu všech možných stavů (srovnej Taleb, 2014 st. 469). To znamená, že neznáme celou množinu stavů, jakých může systém nabývat, a naše odhady činíme pouze na části této množiny, případně všechny stavy systému známe, ale přiřadíme jim špatnou pravděpodobnost výskytu.

Zranitelnost silničních sítí

Silniční síť je specifická varianta obecné sítě, jejíž vlastnosti se intenzivně zkoumají zhruba posledních dvacet let. V mnoha ohledech je silniční síť jednodušší než obecné sítě, zejména svým topologickým uspořádáním, kdy na jednu obec nebo křižovatku připadá relativně málo cest, které ji spojují s dalšími objekty stejného druhu.

Dopady přerušení úseků

Dopady přerušení úseků jsou obecně dvojího druhu. Jednak jsou to dopady *přímé*, které například odpovídají opravě poškozeného spojení, a jednak dopady *nepřímé*, které v sobě mohou zahrnovat nemožnost dostat nějaké zboží do určité části sítě nebo delší objížďku, která vede k větším ekonomickým nárokům na dodavatele.

Přímé dopady přerušení úseku

Při hodnocení přímých dopadů nějaké události bereme v úvahu zejména náklady na znovuvybudování (zničeného) úseku infrastruktury. Tyto náklady mohou mít pro různé úseky různé hodnoty s ohledem na to, jestli se jedná o kritický bod infrastruktury, nebo ne. Kritickým bodem infrastruktury může být například tunel. V takovém případě jsou náklady na rekonstrukci až řádově vyšší oproti běžnému úseku. Většinu informací o nákladech na opravy lze nalézt v cenových mapách. Mezi přímé náklady je třeba započítat i počet obyvatel, kteří zůstanou odříznutí od základních

potravin a služeb, neboť tyto potraviny a služby jim pak musí být během rekonstrukce zajišťovány jinou cestou, například letecky. Na obrázcích 9 a 10 vidíme typické přímé dopady přírodních pohrom.



Obr. 9: Zcela zničená komunikace v důsledku sesuvu u přehrady Bystřička z července 1997. Foto: Karel Kirchner.

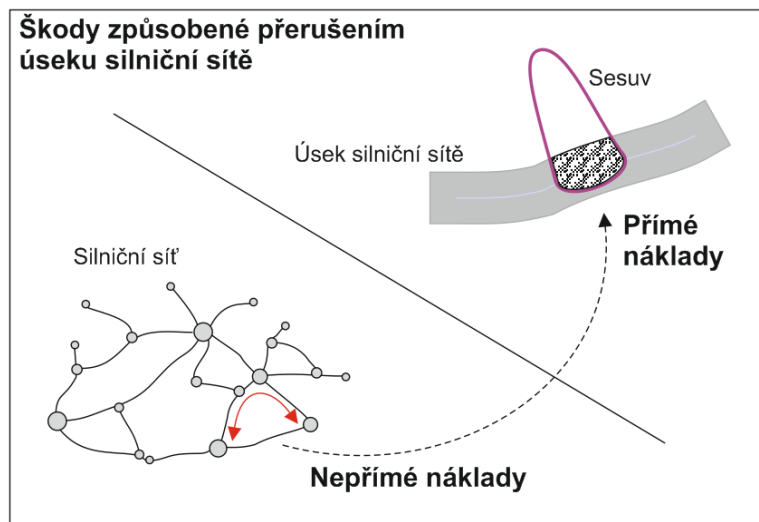


Obr. 10: Další příklad kompletně zničené komunikace vlivem boční eroze vodního toku. Silnice do Lukavce, červenec 1997. Foto: IŽP Moravskoslezského kraje.

Nepřímé dopady přerušení úseku

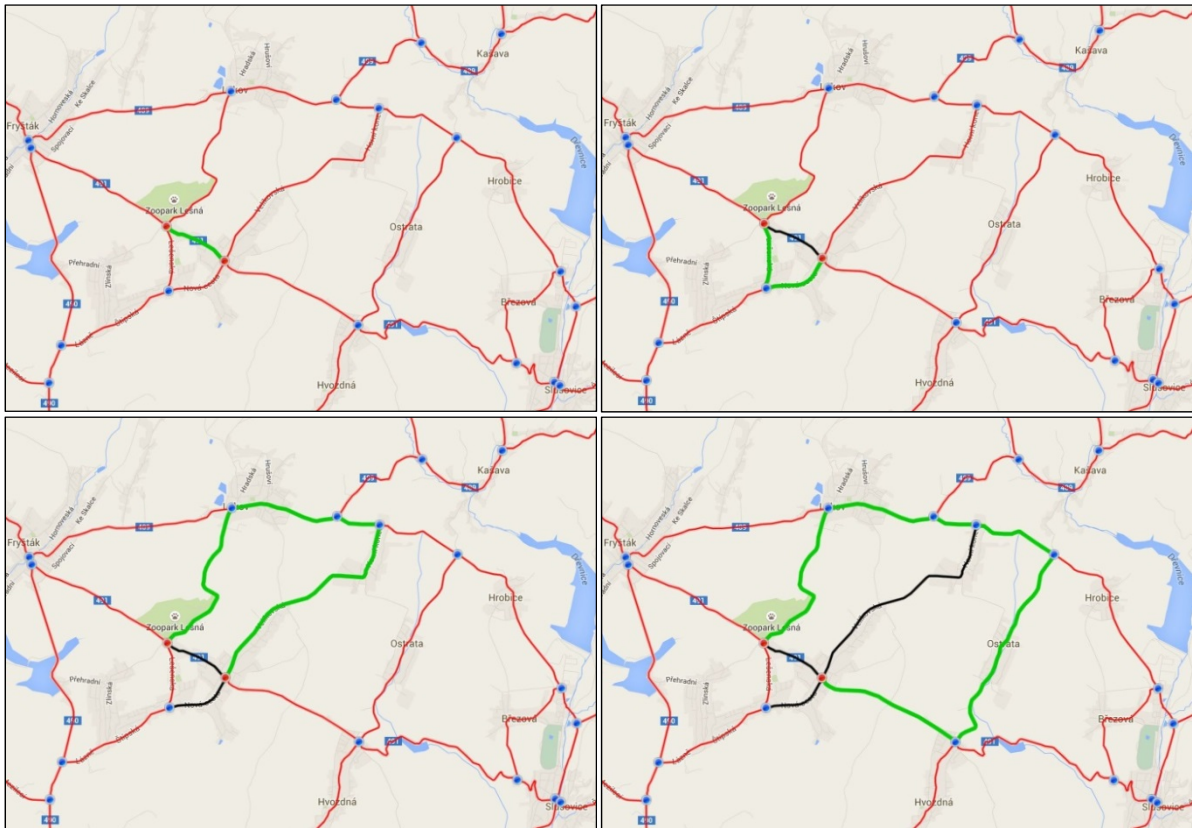
Nepřímé dopady jsou takové dopady, kdy se škoda z poškození objektu nebo území v daném místě projeví na jiných místech sítě, případně kdy ovlivní životy lidí a jejich ekonomickou aktivitu v místech, která jsou od poškozených lokalit vzdálená (Obr. 11). Nepřímé, též vedlejší, dopady se však musí vztáhnout k danému místu poškození, případně přerušení. Typickým příkladem takového nepřímého

dopadu je prodloužení jednotlivých tras při průjezdu daným územím, což vede k ekonomickým ztrátám u subjektů, které mohou sice být od zasaženého území velmi vzdálené, ale tímto územím běžně projížděly. Další komplikací může být jisté omezení služeb, například zrušení železniční stanice, takže namísto kola, které jsem používal na dojížďku na nádraží, musím jet autem, případně zvolit jiný druh dopravy na celou cestu.



Obr. 11: Schematické znázornění faktu, že fyzické poškození určité komunikace vždy znamená nutnost použití objízdné trasy, pokud tato existuje. Zatímco objízdná trasa a s tím související časové prodlevy představují nepřímé náklady poškození daného úseku, vlastní rekonstrukce spadá mezi náklady přímé.

Dodnes se většina studií věnovala analýze dopadů jednoho přerušného úseku v síti (např. Jenelius a kol., 2006), případně analýze dopadů konkrétní kombinace neprůjezdných úseků, které byly přerušeny většinou v důsledku přírodních katastrof. Pokud je takový úsek (resp. skupina úseků) ještě navíc poškozen, lze hovořit o přímých nákladech na rekonstrukci daného úseku. Nepřímé náklady pak budou zahrnovat náklady na objízdné trasy (Obr. 12). Objízdné trasy musí v prvním případě existovat a také musí být pro řidiče akceptovatelné. Tyto trasy se mohou lišit podle druhu vozidla (osobní, nákladní). Dále lze uvažovat náklady na neuskutečněné cesty a další dopady nepřímo způsobené uzavřením daného úseku nebo skupiny úseků.



Obr. 12: Objízdná trasa (zeleně) přerušenoú úseku (černě) může být několikanásobně delší a též časové náročnější, než původní trasa přes přerušenoú úsek. Červené uzly ukazují na místa, mezi kterými probíhá doprava, modré uzly jsou průjezdné. Ne pro všechny druhy cest se vyplatí absolvovat objízdné trasy. Zdroj: www.rupok.cz

Otázkou ovšem zůstává, jaký dopad mají na síť takové kombinace neprůjezdných úseků, z nichž se alespoň část nachází na různých místech sítě. Takové události mohou vzniknout například jako kombinace přírodní katastrofy a plánovaných uzavírek. V následujících kapitolách je uvedena odpověď na tuto otázku.

Někdy je zřejmě vhodnější plánované cesty odložit. Taylor a kol. (2006) k tomuto tématu prezentovali ilustrativní příklad přerušenoú železničního spojení v Austrálii, kdy nejkratší náhradní trasa znamená prodloužení cesty o pět tisíc kilometrů (!). Je zřejmé, že toto řešení není z ekonomického hlediska výhodné, a tudíž nebude realizováno, přestože představuje alternativu k přerušenoú spojení.

Yee a kol. (1996) studovali dopady přerušenoú významné dálnice v USA (Interstate Highway 10) v důsledku zemětřesení. Náklady na zpoždění dosahovaly jenom u motoristů až jednoho milionu dolarů denně, a to i přes zprovoznění objízdných tras, které se však svou kapacitou nemohly vyrovnat přerušenoú úseku.

Události na síti

Nyní se podíváme blíže na události naznačené v přechozí kapitole. Silniční síť je pouze výjimečně prosta přerušených úseků. Toto konstatování je doloženo daty o přerušených úsecích z databáze JSDI. Je s podivem, že mnoho úloh založených na hledání optimálních cest nebere tento fakt do úvahy.

V důsledku provozu v síti a interakcí mezi jednotlivými vozidly vznikají dopravní nehody, přičemž některé z nich mají potenciál přerušit provoz na celém úseku dané komunikace (Obr. 13). Další skupiny dopravních nehod vznikají nepozorností řidičů, vlivem srážek se zvěří nebo v důsledku nepříznivého počasí.

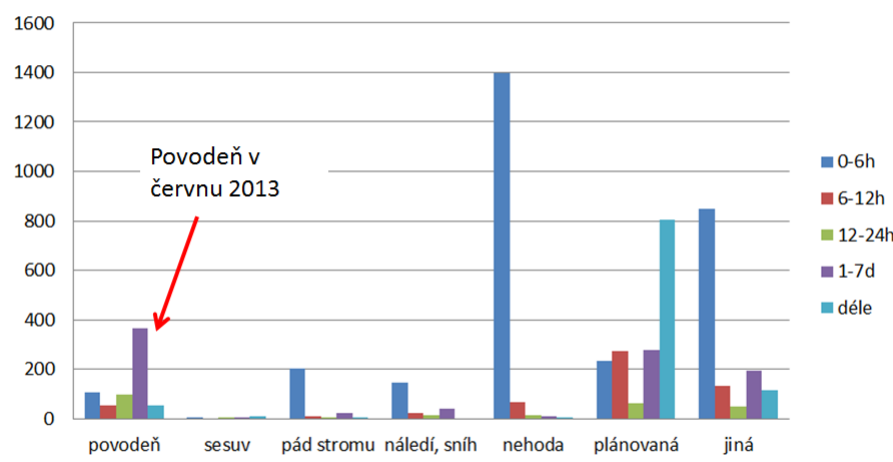


Obr. 13: Přerušení provozu na komunikaci I/52 v důsledku vážné dopravní nehody. Foto: CDV

Silniční síť je taktéž vystavena působení přírodních procesů, které mohou aktivovat svahové deformace nebo povodně. Obě tyto skupiny jevů mají schopnost přerušit dopravu, ale též poškodit vlastní těleso komunikace. Vzhledem k tomu, že jsou známa místa, kde může docházet k povodním, případně sesuvům, je možné se předem připravit. Návrh modelu pro předpověď regionálního ohrožení sesuvy byl publikován autory této práce (Bíl a kol., 2015). Nový sníh působí často přerušení provozu, zejména pokud napadne větší množství sněhu v krátkém časovém intervalu. Tento jev lze do určité míry předpovídat, neboť závisí na množství sněhových srážek. Předpověď extrémních srážek je spolehlivá s předstihem jednoho dne a poměrně věrohodná až na dobu tří dnů. To platí též pro silný vítr způsobující polomy a pády stromů na vozovky.

Přírodní procesy mají na rozdíl od dopravních nehod schopnost zapříčinit výrazné omezení provozu na regionální úrovni a také jimi poškozené úseky jsou obvykle neprůjezdné mnohem delší dobu (viz Obr. 14).

Příčina přerušení silnic v ČR dle délky přerušení,
prosinec 2012 - červenec 2013



Zdroj: data JSDI (Jednotný systém dopravních informací)

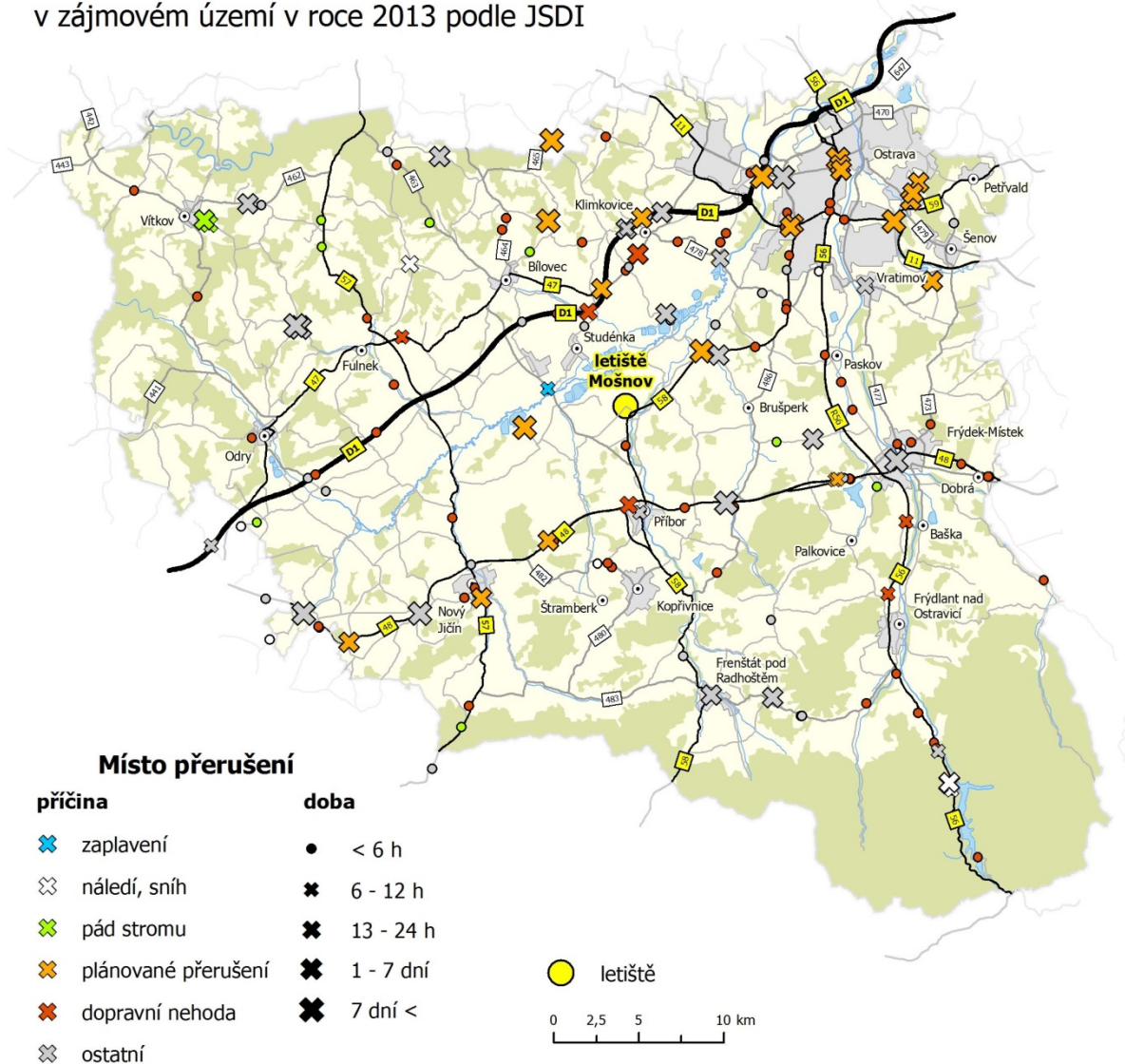
Obr. 14: Analýza dat z JSDI ukazuje, že úseky silniční sítě jsou přerušovány relativně často, z mnoha příčin, kdy nečastější jsou dopravní nehody, o různé době trvání neprůjezdnosti úseku.

Poslední skupinou přerušení provozu jsou plánované uzavírky, které se mohou dostat do vzájemného konfliktu, pokud mezi jednotlivými správci komunikací neexistuje výměna informací.

Všechny tři základní příčiny přerušení se mohou překrývat, resp. vznikat současně (Obr. 15). Navíc v těchto případech je téměř vždy přerušeno více úseků. Například ve Zlínském kraji jsou denně jen vlivem uzavírek a nehod neprůjezdné průměrně čtyři úseky. V případě jakékoli katastrofy může být dopad na celou síť fatální anebo paradoxně minimální. Hodně totiž závisím na tom, které úseky jsou přerušeny. Z tohoto důvodu je tedy nutné identifikovat takové kombinace úseků v síti, které mají na síť největší dopad a naopak ignorovat ty, jejichž dopad je minimální.

Přerušeni provozu na komunikacích

v zájmovém území v roce 2013 podle JSDI



Obr. 15: Ukázka přerušeni provozu na silniční síti v okolí letiště Mošnov za rok 2013. Je zřejmé, že mohou nastat situace, kdy současně vzniklá přerušeni způsobí odříznutí území od sítě.

Metody identifikace nejslabších úseků v síti

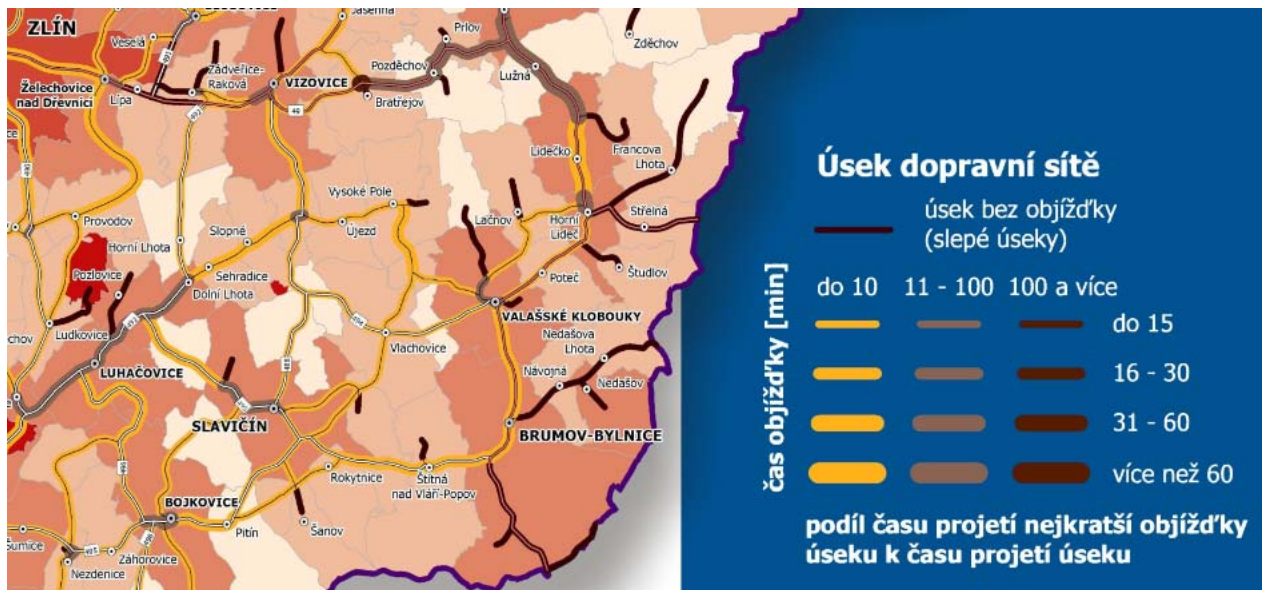
Jak bylo zmíněno na konci přechodí kapitoly, ne každá kombinace neprůjezdných úseků musí mít závažný dopad na síť. Z tohoto důvodu zavádíme pojem *nejslabšího úseku* v síti, čímž rozumíme takové úseky, jejichž vyřazení z provozu má na systém nejcitelnější dopady. Proto se termín *nejslabší* nahrazuje synonymem *kritický*. Obvykle se jedná o úseky významné, např. dálniční úseky, důležité mosty, tunely (např. Obr. 16) apod., ale často jsou to i úseky, které mohou způsobit odříznutí nějaké části území včetně jeho obyvatel od zbytku sítě. Mezi těmito úseky se mohou objevit též úseky komunikací nižších tříd.



Obr. 16: Portál tunelu Hřebeč zavalený sesuvem v březnu 2006. Příklad významné dopravní infrastruktury, jejíž uzavření vždy působí výrazné dopravní komplikace (foto: Oldřich Krejčí, ČGS).

Objízdné trasy přerušovaných úseků

Aplikace základních postupů hodnocení zranitelnosti jsou poměrně bezproblémové. Pokud se právě nejedná o koncový úsek sítě, potom vždy existuje, alespoň pro osobní vozidla, objízdná trasa (Obr. 17).



Obr. 17: Výřez z mapy „Hodnocení zranitelnosti silniční sítě ve Zlínském kraji“, kterou CDV vytvořilo pro KÚ Zlínského kraje v roce 2012. Je zřejmé, že hodnocení objíždných tras je možné provádět dvěma způsoby: absolutní délkou objíždné trasy a relativním srovnáním s postiženým úsekem.

V případě nákladních vozidel nebo jiné speciální techniky je potom třeba mít dodatečné informace o překážkách na komunikacích, např. nosnostech mostů, světlych výškách podjezdů, poloměrech oblouků, ale též o rozměrech vlastních vozidel. Současné databáze silničních sítí neobsahují informaci o poloměrech oblouků, a tudíž je potřeba tyto poloměry ze známých digitálních dat určit.

Analýza silniční geometrie z digitálních dat

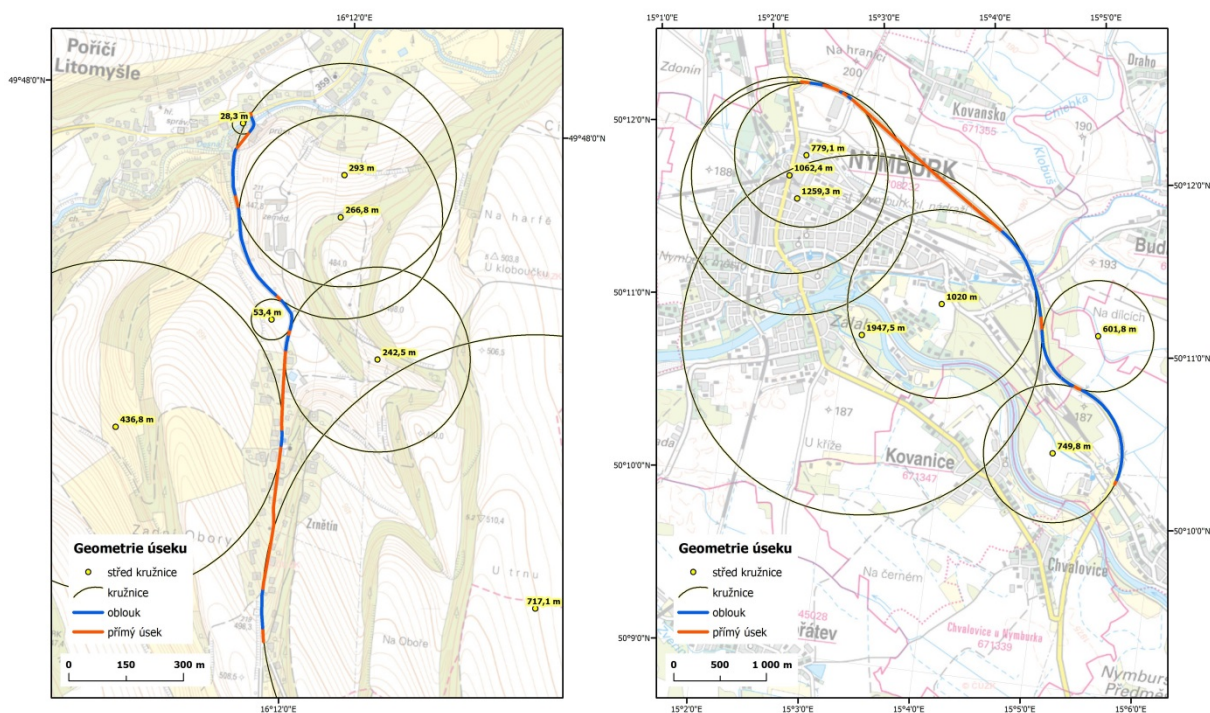
Identifikace silniční geometrie je problémem, který byl v posledních letech důkladně studován zejména díky rostoucímu využití GIS. Nedávné články (Bogenreif a kol., 2012; Findley a kol., 2012; Rasdorf a kol., 2012) z odborných časopisů ovšem poukázaly na skutečnost, že v současné době není dostupná žádná metoda plně automatické identifikace geometrie, a to nejen silniční.

Obecně lze metody identifikace geometrie rozdělit do tří skupin:

- manuální – identifikace je provedena expertem; jedná se o nejspolehlivější metodu, jež je ovšem extrémně pomalá a časově náročná;
- kombinovaná – nejčastěji používaný přístup, při kterém expert identifikuje začátek a konec oblouku a software již za něj dopočítá poloměr oblouku a jeho délku; tento přístup je také časově náročný;
- automatická – při práci s rozsáhlou silniční sítí je potřeba mít k dispozici automatickou metodu identifikace geometrie; v současné době existuje pouze „Curve Finder“ (Findley a kol., 2012), který je schopen geometrii automaticky identifikovat; přesnost tohoto softwaru se ovšem pohybuje pouze okolo 69 %.

Kvůli slabé přesnosti dostupných automatických metod identifikace silniční geometrie jsme vyvinuli metodu vlastní. Tato metoda používá geometrických atributů zjištěných z bodů ležících na silnici, jako jsou kumulativní projeté úhly a poloměry kružnice opsané a oskulační kružnice. Na základě zmíněných atributů je každý bod silnice klasifikován pomocí klasifikačního stromu (Fuks a kol., 2007) buďto jako bod na přímém úseku silnice nebo jako bod v oblouku.

Odhad přesnosti námi navrhnutého přístupu (detailně popsán v Andrášik a Bíl, v tisku) je 90 %. Navíc v případě aplikace naší metody na reálných datech je přesnost dokonce vyšší, a to 98 % v případě silnice u Nymburka (viz Obr. 18, vlevo) a 92 % u silnice v okolí Poříčí (viz Obr. 18, vpravo).



Obr. 18: Ukázka analýzy silniční geometrie pomocí námi vyvinutého algoritmu.

Tohoto postupu je možné využít například při hodnocení optimálních tras pro speciální hasičskou techniku, nebo pro rozměrné náklady. Těmito údaji o poloměrech oblouků lze rovněž vybavit i aktuální datové sady silniční sítě, které se na území ČR používají. Jedná se především o *Global Network*, *StreetNet* nebo *ULS*.

Sekundární slabé úseky silničních sítí

Analýza dopadů přerušení jednoho úseku většinou nezpůsobuje žádný problém, protože se buď jedná o slepý úsek, a tedy je jasné, jaká část sítě se stane nedostupnou, nebo neprůjezdný úsek není slepý, a pak vždy existuje objízdná trasa. Problémy nastávají, pokud se odhodláme sledovat dopady přerušení dvou a více úseků. Takové situace nejsou vůbec řídké. Jak plyne z dat o skutečných přerušeních silniční sítě, například ve Zlínském kraji jsou během roku průměrně čtyři úseky z celkového počtu 974 (pouze úseky mimo uliční síť) neprůjezdné. V takovém případě musíme mít povědomí o aktuálním stavu průjezdnosti všech úseků v síti. Je zřejmé, že mohou nastat situace, kdy dojde k odříznutí části území od celé sítě nebo ke kritickému přetížení některých úseků na objízdných trasách (viz Obr. 19).



Obr. 19: Ukázka skutečných dopadů události z července 1997 v části Zlínského kraje. Na zjednodušené síti jsou čárkovaně označeny úseky, které byly přerušeny. Barevně jsou potom jejich objízdné trasy. Čísla ukazují na počet objízdných tras vedoucích přes daný úsek. Čárkovaný úsek bez barvy nemá objízdnou trasu. Šipky ukazují na úseky, které byly využívány jako součást objíždky jiného úseku šestkrát.

Důležitost běžných úseků silniční sítě, které se mohou v důsledku změněné topologie stát náhle, z pohledu dostupnosti území, úseky kritickými, je uvedena na Obr. 19. Relativně krátké úseky byly využívány jako objízdné trasy až šesti dalších přerušovaných úseků. Tento příklad, přestože vychází z reálných dat, je pouze model, ale ukazuje na koncept kritických úseků a zejména na fakt, že seznam kritických úseků musí být udržován dynamicky, viz další kapitola. Tyto úseky, jejichž důležitost nemusela být při plně fungující síti zjevná, můžeme nazvat jako sekundární slabé úseky.

Statické a dynamické scénáře

Silniční síť, převedenou do podoby grafu, lze snadno pomocí námi vyvinutých algoritmů hodnotit, a to dvěma způsoby. Prvním z nich na neporušené síti můžeme nejen předem identifikovat takové úseky, jejichž *současné* přerušení způsobí nejhorší následky, ale i spočítat množinu kombinací takových neprůjezdných úseků, které budou mít na síť dostatečně závažný dopad. Takové, předem spočítané, scénáře označujeme jako *statické*. Dopravní systém je však dynamický, v každém okamžiku se může lišit počet úseků, jež jsou aktuálně neprůjezdné. Abychom byli schopni scénáře aktualizovat, potřebujeme přísun online dat. To je zabezpečeno existencí JSDI. Aktuální data pak buď mohou vstoupit do našich algoritmů, které poskytnou informace o nejhorších možných rozpadech, nebo mohou být použita pro porovnání s výše uvedenou množinou kombinací neprůjezdných úseků, což nám poskytne informaci o tom, zda se náhodou už nenacházíme poblíž nějaké kombinace neprůjezdných úseků se závažným dopadem na síť. V tomto případě pak mluvíme o *dynamickém* scénáři.

Rychlost výpočtu

Jedním z hlavních omezujících faktorů pro analýzu dopadu kombinace dvou a více neprůjezdných úseků je vysoká časová náročnost výpočtů. Hlavním přínosem této metodiky je tak návrh nových algoritmů, které jsou výrazně rychlejší než běžně používaný kombinatorický přístup a mají tedy schopnost identifikovat a ohodnotit vyšší počet současně přerušených úseků, a to v rozumném čase, anebo ohodnotit libovolný počet neprůjezdných úseků za cenu, že se nám s největší pravděpodobností nepodaří najít nejhorší kombinaci neprůjezdných úseků, ale najdeme jen velké množství jejich dostatečně špatných kombinací. Tímto druhým přístupem se snažíme obejít skutečnost, že tento typ úloh patří mezi tzv. NP-složitě úlohy, tj. mezi úlohy, jejichž výpočetní náročnost roste exponenciálně s počtem úseků v síti a s počtem neprůjezdných úseků.

Aplikace účelových funkcí

Účelovou funkcí rozumíme takovou funkci, která nám na základě požadovaného kritéria umožní setřídít výsledky od nejhoršího po nejlepší. Tato kritéria mohou být různá. Jak už jsme zmínili dříve, mezi nejdůležitější kritéria patří finanční náklady na opravu sítě a absolutní počet obyvatel, kteří zůstanou odříznuti mimo síť. Lze přirozeně vytvořit také jiná kritéria, například přítomnost důležité infrastruktury, průmyslového objektu, objektu s významem pro obranu státu. Další zajímavou účelovou funkcí je funkce, která je schopna ohodnotit i jednotlivé stavy v případě, že se síť rozpadne na více částí se stejným počtem odříznutých obyvatel. V takovém případě považujeme stav, kdy v odříznutých částech sítě je přibližně stejný počet lidí za horší, než když v jedné odříznuté části žije výrazně více obyvatel než v ostatních. V druhém případě totiž stačí, když se přednostně věnujeme opravě komunikací do té části sítě s největším počtem obyvatel a ostatní odříznuté lidi akutně řešíme například pomocí letecké dopravy. Příkladem takové účelové funkce je funkce:

$$F(G_n) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n+1} (P_i - \langle P \rangle)^2}{n}},$$

kde n je počet přerušených úseků, $n+1$ je tedy maximální počet komponent (částí sítě), na který se síť může rozpadnout, G_n je graf s n neprůjezdnými hranami (úseky), P_i je počet lidí, kteří žijí v i -té komponentě a

$$\langle P \rangle = \frac{1}{n+1} \sum_{i=1}^{n+1} P_i .$$

Pokud je celkový počet komponent jen m , kde $m < n$, pak položíme $P_i = 0$ pro $i > m$. U posledního příkladu vědomě používáme terminologii z teorie grafů, protože tato účelová funkce je univerzální pro různé sítě, které jsou reprezentovány grafy, tedy nejen pro silniční síť. Stačí například položit počet lidí, kteří žijí v jednom uzlu, rovno jedné, a hned máme k dispozici informaci o rovnoměrnosti počtu odříznutých uzlů v jednotlivých komponentách.

Základní algoritmy

V této kapitole si představíme dva základní algoritmy, které jsme vyvinuli v rámci společného výzkumu s kolegy z Fakulty informatiky MU a CERIT pro rychlejší analýzu rozpadů zadané sítě. Tyto algoritmy nám umožňují efektivněji identifikovat kritická místa v silniční síti. Dále jsou tyto algoritmy přínosem pro teorii grafů a mohou být použity na jakékoli grafy a není tedy potřeba se omezovat pouze na grafy, které reprezentují silniční síť.

Kružnicový algoritmus

První z těchto algoritmů jsme nazvali *kružnicový* (angl. cycles, viz *Vodák a kol., v tisku*) a jedná se o deterministický algoritmus, tj. o algoritmus, který přesně nalezne rozpad grafu s největším dopadem měřeným pomocí vhodně zvolené účelové funkce. Tento algoritmus jsme aplikovali na graf, který reprezentuje silniční síť Zlínského kraje a je indukovaným podgrafem grafu silniční sítě České republiky a porovnali ho s *kombinatorickým* algoritmem, tj. s algoritmem, jenž prochází všechny kombinace zadaného počtu hran. Shrnutí výsledných časů uvádíme v následující tabulce, kde šedý údaj je jenom naším odhadem vypočteným na základě znalosti počtu všech kombinací a doby trvání ohodnocení jedné kombinace.

Tabulka 1: zhodnocení rychlosti stávajících a navrhovaného algoritmu

Počet přerušovaných hran	Kombinatorický algoritmus	Kružnicový algoritmus
1	1 s	1 s
2	30 s	14 s
3	10,25 h	4 min
4	105 dnů	11,5 h

Z uvedeného příkladu v tabulce plyne, že pomocí stávajících kombinatorických algoritmů je časově extrémně náročné tvořit předpovědi pro více než tři současně přerušované úseky. Dále je patrné, že výsledky dosažené naším algoritmem jsou velmi výrazně lepší.

Z tabulky je nicméně patrné, že ani námi navrhovaný algoritmus není schopen vzdorovat fyzikální realitě. Při našich testech se ukázalo, že pro šest a více hran se opět dostáváme mimo rozumné časové rozmezí. Přesto pro běžný provoz Zlínského kraje je počet čtyř neprůjezdných hran dostatečný, neboť se jedná o průměrný počet neprůjezdných hran. Toto omezení nás nicméně vedlo k vývoji stochastického algoritmu, který je schopen, za určitou cenu, toto omezení obejít.

Pseudokód kružnicového algoritmu

Navržený deterministický algoritmus umožňuje prozkoumat vhodnou podmnožinu stavového prostoru grafu v rozumném čase. Algoritmus prochází všechny minimální řezy daného grafu s předem definovaným počtem přerušovaných hran a komponent, případně s dalšími omezujícími podmínkami. Hlavní myšlenkou algoritmu je hledat v grafu kružnice (viz Obr. 6). Pseudokód algoritmu je následující:

Vstupní parametry:

- graf* – souvislý ohodnocený graf
maxHran – celé číslo z intervalu $[1, |E|]$, udává maximální počet hran v nalezených řezech, přičemž $|E|$ označuje počet prvků množiny E
maxKomponent – celé číslo z intervalu $[2, \maxHran+1]$, udává maximální počet komponent generovaných řezy

Algoritmus D.1: najdiMinimalniRezy(*graf*, *maxHran*, *maxKomponent*)

global *kostra* = najdiKostru(*graf*)

CS = \emptyset

// výpočet

for všechny hrany *hrana* \in *kostra* **do**

CS = *CS* \cup najdiRezy(1, \emptyset , *hrana*)

endfor

// filtrování řezů, které nejsou minimální

minCS = \emptyset

for všechny řezy *cs* \in *CS* **do**

if jeMinimalniRez(*cs*) **do**

minCS = *minCS* \cup {*cs*}

endif

endfor

return *minCS*

Algoritmus D.2: najdiRezy(*urovenRekurze*, *zakazaneHrany*, *hrana*)

zakazaneHrany = *zakazaneHrany* \cup *hrana*

rezy = \emptyset

kruznice = najdiKratkouKruznici(*hrana*, *zakazaneHrany*)

if *kruznice* existuje **then**

if $|zakazaneHrany| < \maxHran$ **then**

for všechny hrany *c* \in *kruznice* **do**

rezy = *rezy* \cup najdiRezy(*level*, *zakazaneHrany*, *c*)

endfor

endif

else

rezy = *rezy* \cup {*zakazaneHrany*}

if $|zakazaneHrany| < \maxHran$ AND *level* + 1 < *maxKomponent* **do**

for všechny hrany *f* \in *kostra* \setminus *zakazaneHrany* **do**

rezy = *rezy* \cup najdiRezy(*urovenRekurze* + 1, *zakazaneHrany*, *f*)

```

    endfor
  endif
endif
return rezy

```

Algoritmus D.3: *najdiKratkouKruznici(hrana, zakazaneHrany)*

```

 $E' = E_{graf} \setminus zakazaneHrany$ 
 $G' = (V_{graf}, E')$ 

```

```

vrchol  $v_1 = hrana_{v_1}$ , vrchol  $v_2 = hrana_{v_2}$ 
cesta = najdiKratkouCestu( $G', v_1, v_2$ )
return cesta

```

Popišme krátce Algoritmus D.1. Začíná určením všech řezů obsahujících hrany tvořící kostru grafu (poněvadž všechny řezy musí obsahovat hranu z kostry grafu). Řezy generované dalšími hranami (a obsahující konkrétní hranu) jsou potom hledány rekurzivním voláním funkce *najdiRezy(uroven rekurze, zakazaneHrany, hrana)* (viz Algoritmus D.2), který využívá kružnic v grafu k identifikaci hran patřících do hledaných řezů (jelikož každá hrana v řezu musí snížit počet kružnic obsahujících hranu v grafu). Pokud taková kružnice neexistuje, byl nalezen řez určený množinou hran *zakazaneHrany*; algoritmus pak může dále pokračovat hledáním řezů rozkládajících graf do více komponent. Poté co nalezneme všechny řezy, jsou odfiltrovány řezy, které nejsou minimální (viz poslední část algoritmu D.1).

Velkou výhodou algoritmu je to, že může být připraven pro paralelní implementaci, jelikož více výpočetních vláken může současně zpracovávat hrany uložené v množině *kostra* (Algoritmus D.1). Rychlost celkového výpočtu tedy souvisí nejen s velikostí sítě a počtem neprůjezdných hran, ale i s paralelizací celého výpočtu.

Stochastický algoritmus

Hlavním důvodem pro stochastický přístup je skutečnost, že nejsme schopni v rozumném čase spočítat pomocí deterministického algoritmu rozpad sítě pro šest a více neprůjezdných hran. Cenou, kterou ale za to u stochastického přístupu musíme zaplatit je, že rezignujeme na nalezení nejhorší možné kombinace neprůjezdných hran. To znamená, že se vědomě smiřujeme s faktem, že nemusíme poznat všechny „špatné“ kombinace a mezi nimi dokonce s velkou pravděpodobností ani tu nehorší. Nicméně algoritmus je schopen vybírat dostatečně kritické scénáře, a to i pro větší počty neprůjezdných hran. Další výhodou těchto algoritmů je, že pracují relativně rychle a mohou nabídnout výsledky pro značný počet současně přerušovaných úseků. Jejich využití leží tedy v modelování dopadů rozsáhlejších krizových stavů, například povodní, sesuvných kalamit apod.

Simulované žihání

Celý stochastický algoritmus stojí na simulovaném žihání (Spall, 2003), což je fyzikální proces, během kterého se ohřáté těleso postupně ochlazuje a směřuje ke stavu s minimální energií. Převedením tohoto procesu do algoritmu jsme schopni náhodně procházet rozsáhlé stavové prostory a hledat minima (maxima) dané účelové funkce. Celý algoritmus si uvedeme ve standardní podobě pro

hledání minima účelové funkce. V případě, že chceme naopak hledat maximum účelové funkce, tak si stačí uvědomit, že platí tento vztah:

$$\min ucFunkce = -\max(-ucFunkce)$$

Celý algoritmus má následující podobu:

Algoritmus S.1: *simZihaniZranitelnost(graf, teplota, teplotniRozmezi, ucFunkce, pocetNeprHran)*

neprHrany = *generujNeprHrany(graf, pocetNeprHran)*

nejVysledek = *ucFunkce(neprHrany)*

aktStav = *nejVysledek*

n = *teplota/teplotniRozmezi* - 1

while *teplota* > 0 **do**

if *teplota* < *n* * *teplotniRozmezi* **then**

pocetNeprHran = *pocetNeprHran* - 1

n = *n* - 1

endif

noveNeprHrany = *generujNeprHrany(graf \ neprHrany, pocetNeprHran)*

 // hranami z *noveNeprHrany* nahrad' *pocetNeprHran* náhodně vybraných hran z *neprHrany*, které se tak stanou průjezdné

delta = *ucFunkce(neprHrany)* - *aktStav*

if *delta* < 0 **then**

aktStav = *ucFunkce(neprHrany)*

nejVysledek = *min(aktStav, nejVysledek)*

else

 // vygeneruj náhodné číslo *u* z intervalu (0, 1)

if *u* <= *exp(-delta/teplota)* **then**

aktStav = *ucFunkce(neprHrany)*

endif

endif

teplota = *teplota* - 1

endwhile

Z algoritmu S.1 je patrné, že připouštíme zhoršení nejlepšího dosaženého výsledku (proměnná *aktStav*). Nejlepší dosažený výsledek a příslušnou kombinaci hran si ale samozřejmě ukládáme (ve výše uvedeném algoritmu ale pro lepší čitelnost tyto hrany neukládáme). Smyslem toho, že připustíme zhoršení aktuální hodnoty účelové funkce (proměnná *aktStav*), je, že tímto postupem zabráníme účelové funkci v tom, aby uvázla v lokálním minimu. Dále snižováním počtu neprůjezdných hran (proměnná *neprHrany*) vynucujeme prohledávání blízkého okolí aktuální kombinace neprůjezdných hran v příslušném stavovém prostoru. Celý algoritmus je velice rychlý a pro prohledání co největší části stavového prostoru, tedy pro maximalizaci šance, že najdeme nejlepší řešení, je nutného ho použít opakovaně. Současně není problém během běhu programu průběžně ukládat zadaný počet nejlepších dosažených výsledků.

Případová studie – Zlínský kraj

Pro názornou ukázkou aplikace metodiky identifikace kritických úseků jsme vybrali území Zlínského kraje (Obr. 20), na němž lze s výhodou demonstrovat základní postupy analýz slabých úseků sítě. Zlínský kraj totiž patří mezi plošně nejmenší kraje v České republice, a proto patří výpočty prováděné na jeho silniční síti k časově nejméně náročným ve srovnání s ostatními kraji (viz např. Bíl a kol., v tisku). Navíc topologie jeho silniční sítě je, v důsledku přítomnosti pohoří Vnějších Západních Karpat, velmi náchylná k problémům omezení dostupnosti důsledkem přerušení důležitých úseků silnic.



Obr. 20: Silniční síť Zlínského kraje ve zjednodušené podobě. Průměr jednotlivých uzlů odpovídá počtu obyvatel. Z prvního pohledu je zřejmé, kde se nacházejí centra osídlení a kolik do nich směřuje úseků komunikací. Objízdné trasy vedené za hranice kraje a ČR je třeba pro účely modelování udržovat průjezdné, abychom dosáhli všech vnitřních rozpadů sítě. Zdroj dat: Silniční databanka Ostrava.

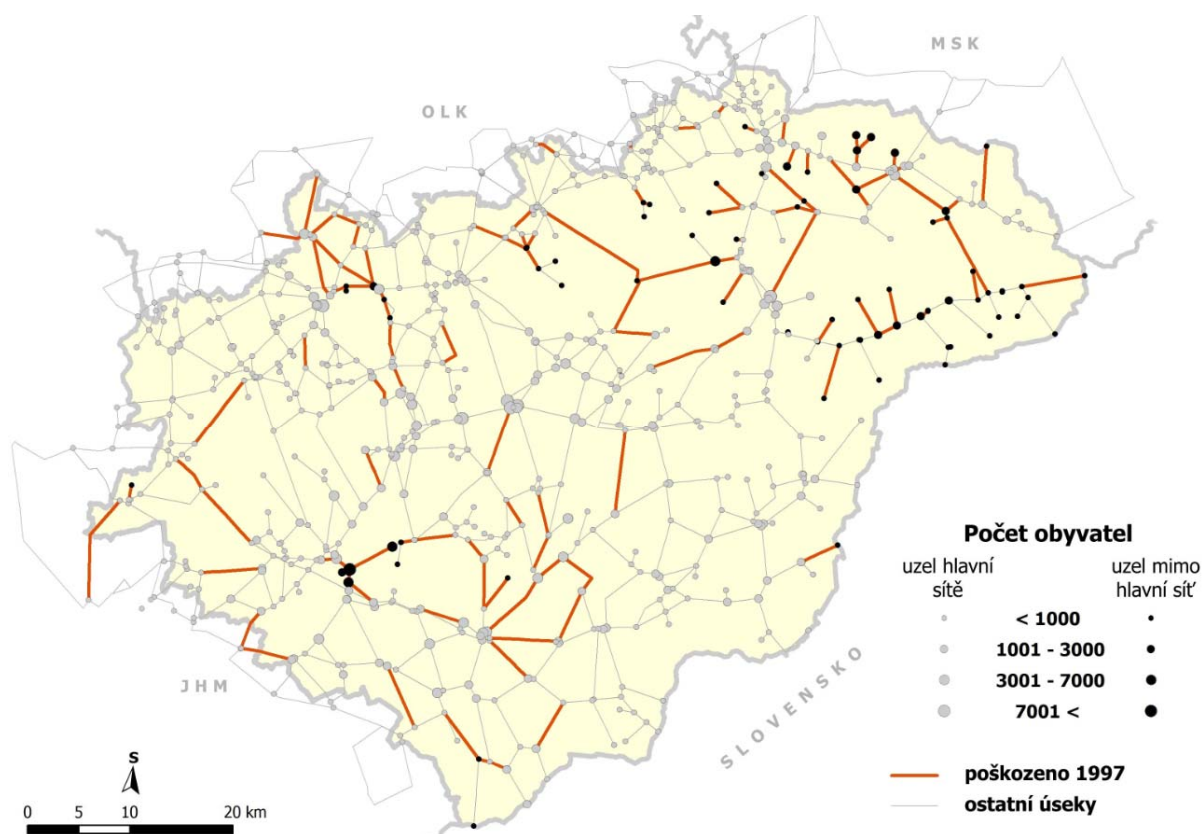
Tabulka 2: Srovnání délek jednotlivých krajských silničních sítí.

Název kraje	Délka silniční sítě (km)
Středočeský	9595
Jihočeský	6129
Plzeňský	5116
Vysočina	5068
Jihomoravský	4427
Ústecký	4190
Královéhradecký	3756
Pardubický	3591
Olomoucký	3551
Moravskoslezský	3421
Liberecký	2412
Zlínský	2134
Karlovarský	2029
Praha	178

Příklad dopadů povodní a sesuvné kalamity z července 1997

Nejhorší dosud zaznamenaná událost na krajské úrovni proběhla právě na území dnešního Zlínského kraje v červenci roku 1997. Extrémní srážky mezi 4. – 8. červencem 1997 převýšily téměř čtyřikrát dlouhodobý průměr pro celý měsíc (Krejčí a kol., 2002). Následkem byly mimořádně ničivé povodně, na mnoha místech následované sesuvy.

V důsledku této události bylo poškozeno celkem 13 % silniční sítě, od hlavní sítě bylo izolováno 46 podsítí, v nichž žilo přibližně 11 % obyvatel. Podobné dopady nejsou srovnatelné s žádným dalším krajem. Na následujícím Obr. 21 jsou vyznačené přerušené úseky a odříznuté uzly.

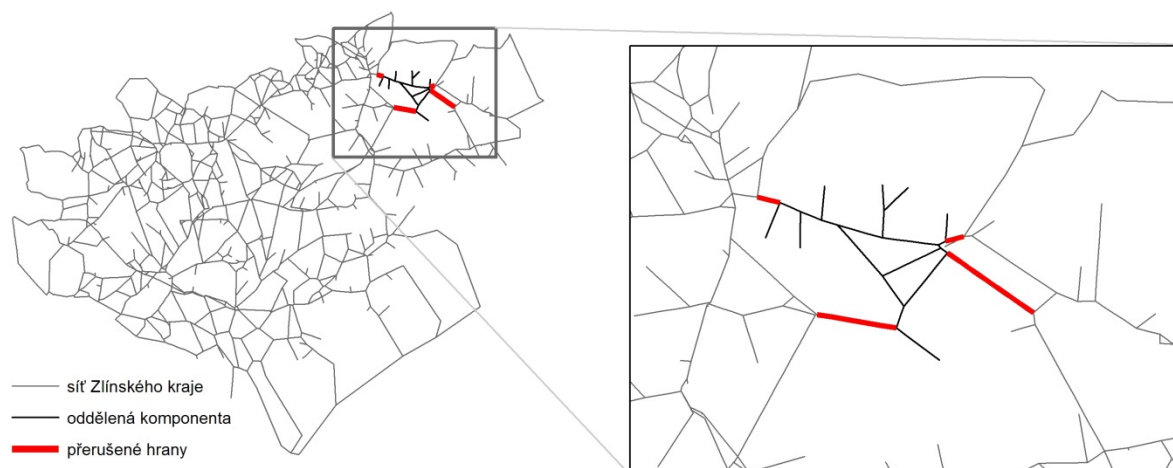


Obr. 21: Zjednodušená silniční síť Zlínského kraje s vyznačenými poškozenými a neprůjezdnými úseky. Velikost uzlu ukazuje na počet obyvatel.

Je zřejmé, že se jedná o extrémní příklad, který je do značné míry ovlivněn topologií silniční sítě, která je úzce spjata s morfologií terénu Zlínského kraje. V běžném provozu však ke krizovým situacím může docházet při současném přerušení již tří úseků. Proto má smysl pracovat se scénáři dopadů všech kombinací přerušení daného počtu úseků. Tím pokryjeme jak úseky neprůjezdné vlivem například plánovaných oprav, tak úseky, které mohou být v kterémkoli okamžiku přerušeny nějakou nenadálou událostí typu dopravní nehody nebo přírodních procesů.

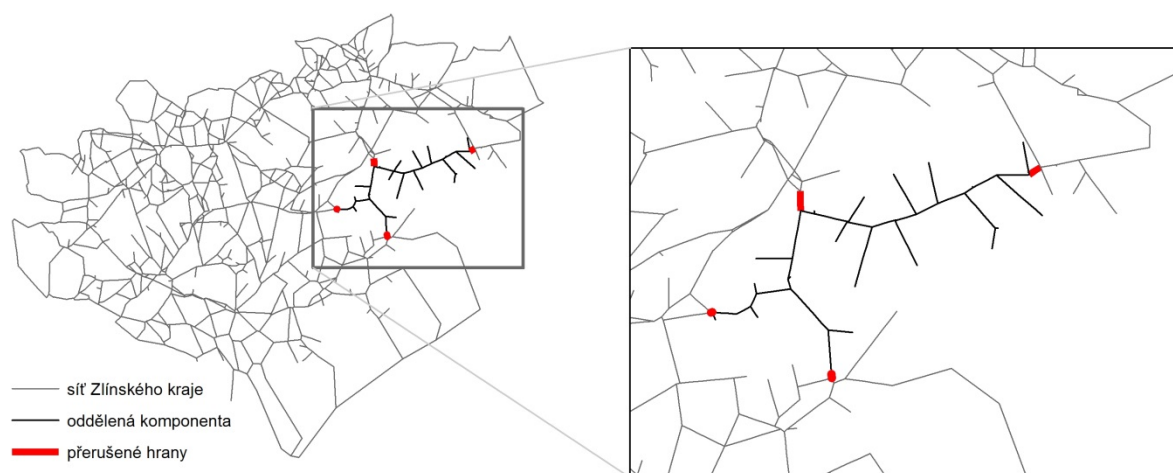
Ukázky aplikací navržených metod na příkladu Zlínského kraje

Podívejme se na výstupy deterministického kružnicového algoritmu. V prvním případě jsme hledali nejhorší rozpad sítě pro případ současného uzavření čtyř úseků, kde hlavním kritériem byl počet odříznutých lidí. Získané výsledky jsou zobrazeny na následujících obrázcích 22, 23 a 24.

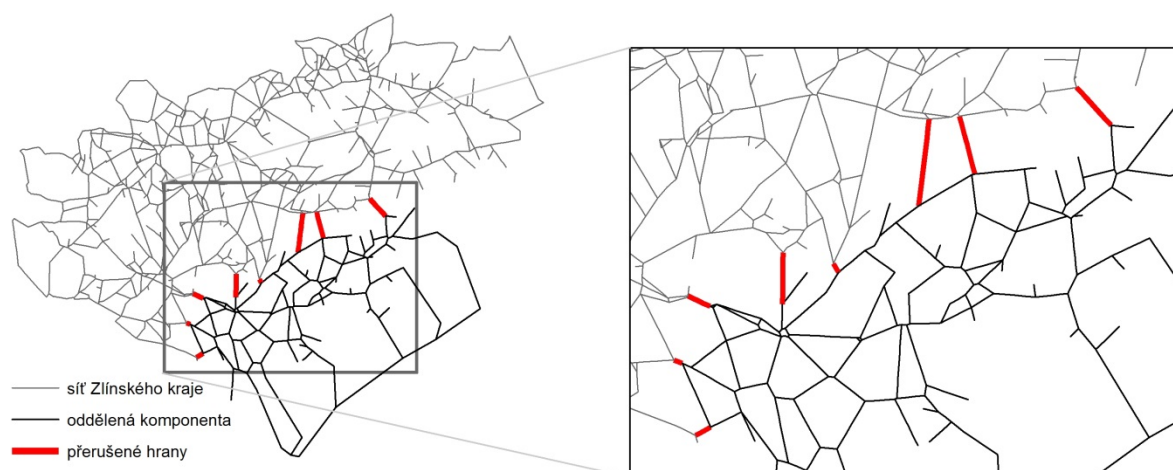


Obr. 22: Příklad nejhoršího rozpadu silniční sítě ZLK na základě nejvyššího počtu současně odříznutých obyvatel od hlavní sítě. Jedná se o rozsáhlé území sahající od města Rožnov pod Radhoštěm po Valašské Meziříčí.

Celý algoritmus lze poměrně jednoduše modifikovat, pokud nás zajímá stejný rozpad sítě, ale s účelovou funkcí, která bere v potaz nikoliv počet obyvatel mimo hlavní síť, ale počet odříznutých uzlů. V tomto případě lze snadno do programu vložit informaci, že v každém uzlu žije právě jeden člověk. Nejhorší výsledek pak vidíme na následujícím obrázku.



Obr. 23: Ukázka výsledku, pokud se v účelové funkci položí počet obyvatel v jednotlivých uzlech roven jedné. Výsledkem je potom identifikace největší izolované sítě v jednotkách počtu uzlů. Toto území zahrnují údolí Vsetínské Bečvy od Velkých Karlovic po Ústí a dále část území od Vizovic po Horní Lideč.



Obr. 24: K odpojení rozsáhlé části Zlínského kraje, z pohledu absolutního počtu uzlů, dojde po přerušení pouhých osmi úseků. Dostupnost je možná pouze extrémně dlouhými trasami přes sousední Slovensko.

Z tvaru sítě a obou výsledků je jasné, že výše uvedené rozpady nelze najít pouhým okem nebo nějakou formou expertního posouzení, ale že je nutné mít k dispozici vhodné a rychlé počítačové programy.

A nyní se podívejme na výstupy *stochastického* algoritmu (Obr. 25 a 26).



Obr. 25: Výsledky aplikace stochastického algoritmu pro čtyři současně přerušené úseky.



Obr. 26: Výsledky aplikace stochastického algoritmu pro pět současně přerušovaných úseků.

Výhodou stochastického algoritmu je jeho rychlost. Prakticky všechny výpočty lze zvládnout do dvou hodin, což se výrazně liší od algoritmů deterministických. Daní za tuto rychlost je potom identifikace pouze části nejhorších možností.

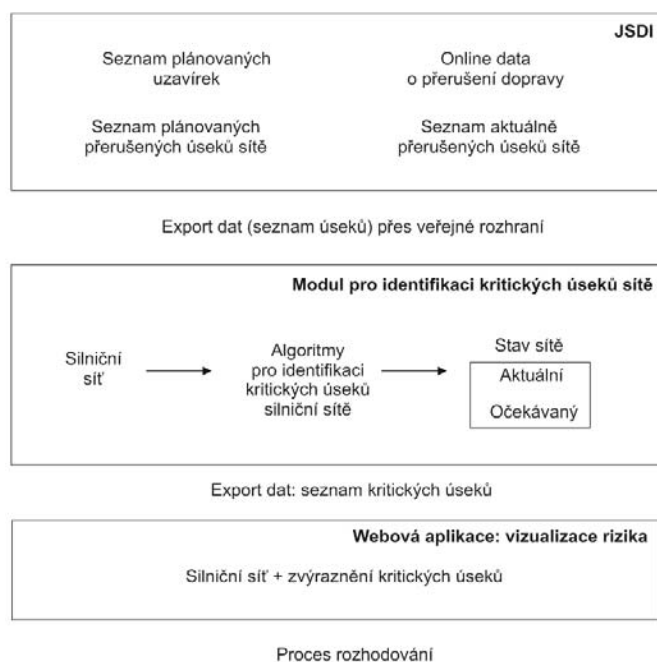
Návrh toku dat a implementace prezentovaných algoritmů

V rámci této metodiky přinášíme návrh implementace uvedených postupů a algoritmů do systému krizového a operačního řízení. Jak bylo uvedeno výše, uvedené algoritmy lze používat ve fázi plánování, kdy je dostatek času na hodnocení alternativ a kdy nejsou na překážku delší výpočetní časy. Současně však můžeme využít v předstihu vypočítaných výsledků, ze kterých je možné vytvořit databázi všech rozpadů sítě a pomocí online sledování aktuálních uzavírek a přerušení silničních komunikací vyhodnocovat, zda se nenacházíme poblíž nějakého kritického stavu sítě.

Je zřejmé, že pojem kritického stavu sítě je úzce spojen s volbou účelové funkce. V závislosti na požadavcích správců silniční sítě je možné volit více těchto účelových funkcí a vypočítat kritické stavy sítě pro libovolně definované funkce. Velikost výsledných databází získaných na základě těchto výpočtů je pak jen limitovaná dostupným úložným prostorem. Správci sítě a orgány krizového řízení pak mohou mít prakticky okamžitě k dispozici vyhodnocení stavu sítě, a to z různých hledisek.

Podívejme se nyní na konkrétní implementaci našich algoritmů. V České republice je dostupný *Jednotný systém dopravních informací (JSDI)*, který představuje unikátní platformu, nad níž je možné stavět další užitečné aplikace. Pomocí dat, která JSDI poskytuje, jsme schopni sledovat aktuální stav silniční sítě. Na Obr. 27 je uveden postup získání dat z JSDI. Jedná se jednak o data aktuálních uzavírek, ale též o data o uzavírkách plánovaných. Tato data vstupují do modulu s vlastními síťovými algoritmy. Uvedené algoritmy se aplikují na reálné silniční síti a výsledkem je několik datových sad s kritickými úseky silniční sítě. Tyto kritické úseky, jejichž průjezdnost je nutné bezpodmínečně zabezpečit, jsou potom zvýrazněny na online krizové mapě, případně v jiném systému nebo jako seznam zasláný na výpis pro koncového uživatele.

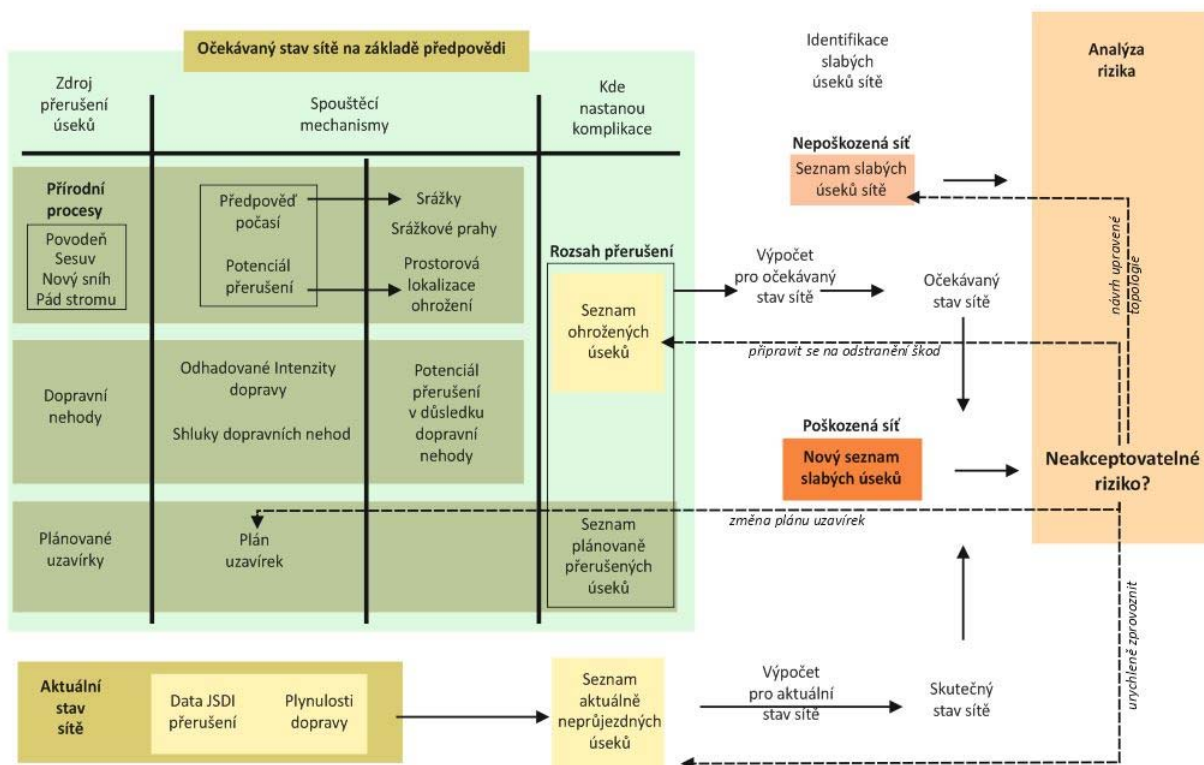
Uvedený návrh je schematický, implementace algoritmů je třeba řešit samostatným projektem v součinnosti se správcem JSDI.



Obr. 27: Schéma možné implementace navrhovaných algoritmů do systému rozhodování Ministerstva dopravy a jím řízených organizací

Podívejme se nyní na celé schéma blíže. Systém JSDI v rámci NDIC obsahuje aktuální data o stavu silniční sítě, ale též data o plánovaném budoucím stavu. To se týká především plánovaných uzavírek. Vzhledem k tomu, že JSDI nabízí export vybraných údajů, je možné odebírat seznam úseků, které jsou buď aktuálně přerušeny, nebo se jejich přerušeni plánuje. Na základě tohoto seznamu můžeme ze sítě vypustit ty úseky, které jsou nebo v krátké době budou neprůjezdné. Tímto způsobem jsme vlastně vytvořili podgraf grafu, který reprezentuje naši původní síť. Tento podgraf pak vstupuje do modulu pro identifikaci kritických úseků silniční sítě. Zde je aplikován algoritmus, pomocí něhož se vyhodnotí, zda nějaké části sítě, resp. obsluhovanému území, hrozí ztráta konektivity, nebo se načtou data z databáze, kde jsou uloženy napočítané kritické stavy sítě v závislosti na volbě účelové funkce, a program vyhodnotí, zda se nenacházíme poblíž nějakého kritického stavu, tj. zda uzavřením jednoho až dvou úseků nedojde k nežádoucímu rozpadu sítě.

Výsledný seznam kritických úseků a potenciálně nebo skutečně ohrožených oblastí je poté zobrazen ve webové mapové aplikaci. Navržený systém předpokládá tři oddělené komponenty: JSDI, systém s modulem obsahující algoritmy pro hodnocení kritických úseků, vizualizační nástroj. V praxi je však možné vše sloučit do jednoho nebo dvou systémů, jak ukazuje schéma na obrázku 28.

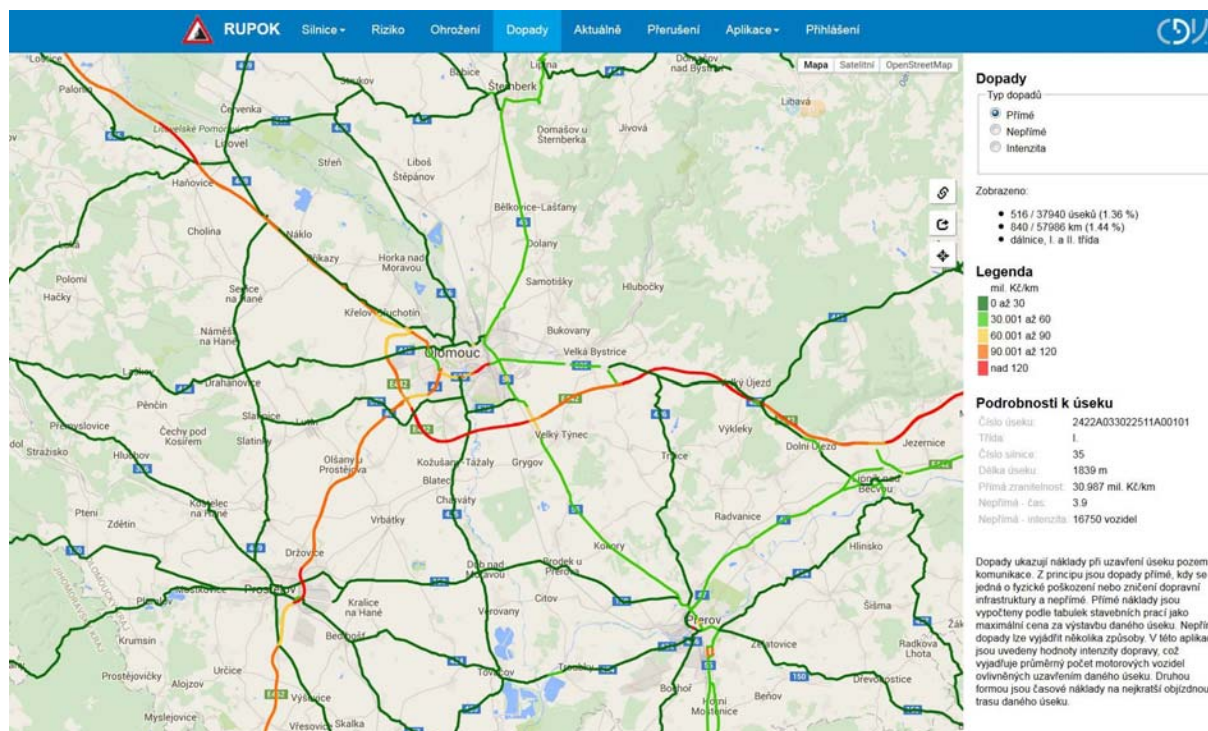


Obr. 28: Schéma návrhu systému pro včasnou identifikaci krizových stavů a slabých (kritických) úseků silniční sítě. Rozpracování předchozího konceptu, viz Obr. 27.

Návrh webové mapové aplikace pro sledování kritických stavů

Centrum dopravního výzkumu, v. v. i. připravilo v rámci projektu TRISK webovou mapovou aplikaci www.rupok.cz (Obr. 29), která slouží k plánování výstavby a přehledu o silniční a železniční síti. Obsahuje též online data o aktuálním přerušení provozu dostupná z JSDI.

V textu bylo zmíněno, že k vizualizaci kritických stavů je třeba webové mapové aplikace. RUPOK se nyní nabízí jako vhodná alternativa, jelikož obsahuje všechna potřebná data.



Obr. 29: Ukázka vzhledu aplikace RUPOK, záložka „Dopady“, které jsou vztaženy k úsekům silniční sítě a vyjadřují náklady na rekonstrukci, počet postižených vozidel a náročnosti objížděných tras.

Webová mapová aplikace Rizika uzavření pozemních komunikací (RUPOK) se skládá z následujících částí:

- **Riziko** – znázorňuje pro jednotlivé úseky komunikací míru rizika vyplývající z možného poškození přírodními procesy. Riziko je počítáno jako součin dopadů při poškození jednotlivých částí sítě pozemních komunikací a pravděpodobnosti výskytu přírodní pohromy (přírodního procesu o dostatečné intenzitě, aby přerušil daný úsek).
- **Ohrožení** – ukazuje ve dvou úrovních (grid vztažený na jednotku plochy území a úseky silniční sítě) pravděpodobnost, že dojde k výskytu události s potenciálem přerušení provozu. Lze vizualizovat celkové ohrožení a potom jeho jednotlivé části, což jsou: sesuvy, povodně a nový sníh. Do výpočtu ohrožení vstupovaly prostorové vrstvy výskytu daného jevu, např. rozlivy při povodních, výskyt svahových deformací a očekávané výšky nového sněhu. Tento potenciál

ohrožení byl doplněn o historické údaje z databáze poškození komunikací, což sloužilo ke zpřesnění odhadu.

- **Dopady** – pro jednotlivé úseky silniční sítě ukazují následky přerušení provozu v podobě přímých a nepřímých dopadů. Přímé dopady představují cenu celého úseku tak, jak byla odhadována na základě tabulek stavebních prací ŘSD. Nepřímé dopady jsou vyjádřeny náklady na objízdné trasy a intenzitou dopravy, tedy počtem vozidel průměrně postižených uzavírkou.
- **Aktuálně** – ukazuje na místa aktuálních přerušení dopravy vlivem přírodních procesů (Obr. 30). Data pocházejí online z JSDI pomocí veřejného datového rozhraní.

Přerušení vlivem přírodních procesů

Nové přerušení

Vrstvy

- Přerušení
- Okresy - počet přerušení

Filtr

Podrobnosti - přerušení

Zoom

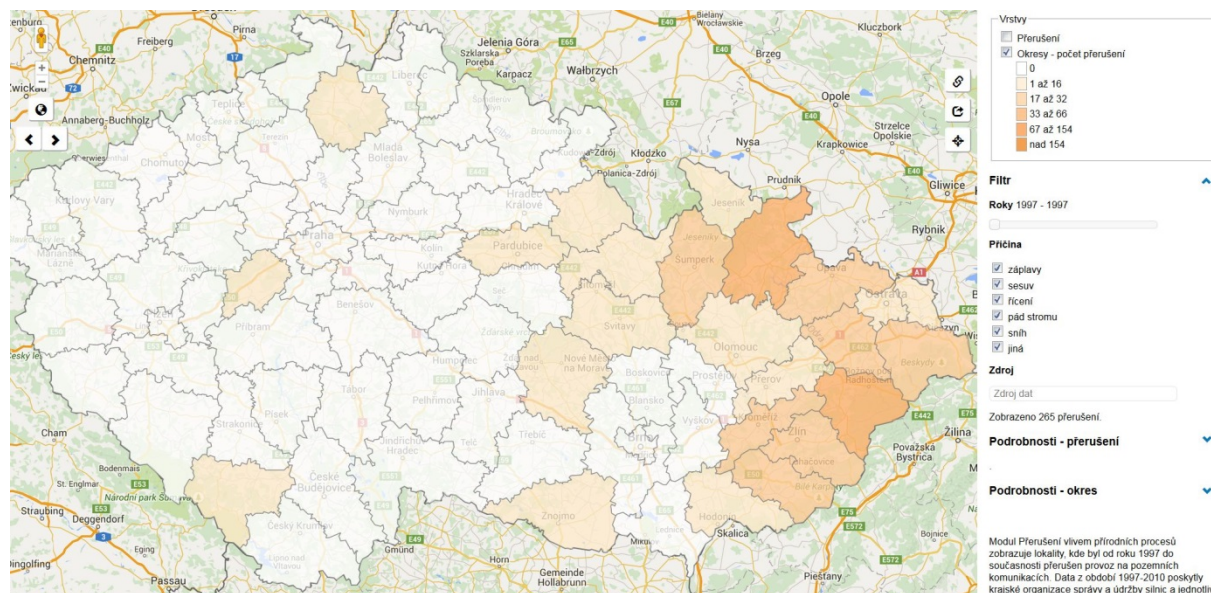
Poškození č.: 3798
 Číslo komunikace: 3634
 Délka (m): null
 Příčina přerušení: sesuv
 Stupeň poškození: null
 Poškozeno od: null
 Poškozeno do: null

Poznámka:
 silnice III/3634, Bystré, část obce Hamry - Stašov, okr. Svitavy, uzavřeno, Od 01.01.2015 00:00 Do 31.12.2015 23:59, Uzavření silnice III/3634 v místě mezi obcemi Hamry - Stašov z důvodu havarijního stavu silnice po sesuvu přilehlého svahu. Uzavírka od křižovatky silnic III/3634 a II/364 po křižovatku se silnicí III/3634 a III/3635. Objízdná trasa od křižovatky silnic III/3634 a II/364 po silnici II/364 až ke křižovatce se silnicí III/3636, po silnici III/3636 ke křižovatce se silnicí III/3635, po silnici III/3635 ke křižovatce se silnicí III/3634, Vydal: Městský úřad Políčka

Zdroj: JSDI

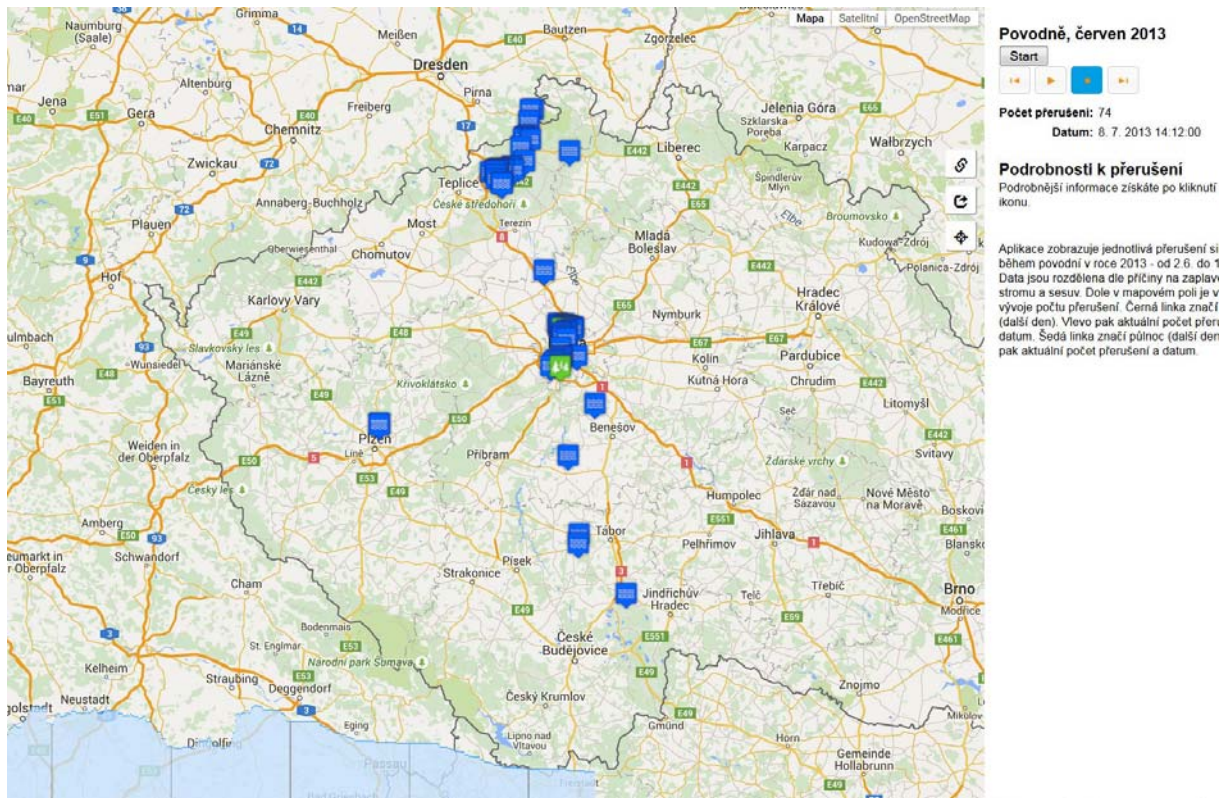
Obr. 30: Ukázka záznamu s popisem specifikující příčinu přerušení dopravy

- **Přerušení** – zobrazuje „*databázi přerušených úseků*“ v důsledku přírodních procesů od roku 1997. Informace jsou dostupné v podobě bodu nebo přepočítány na region (okres). Databáze přerušení je jedinečným výstupem projektu TRISK a unikátní datovou sadou pomocí níž lze počítat ohrožení a kvantifikovat je v rámci jednotlivých úseků silniční sítě (Obr. 31).



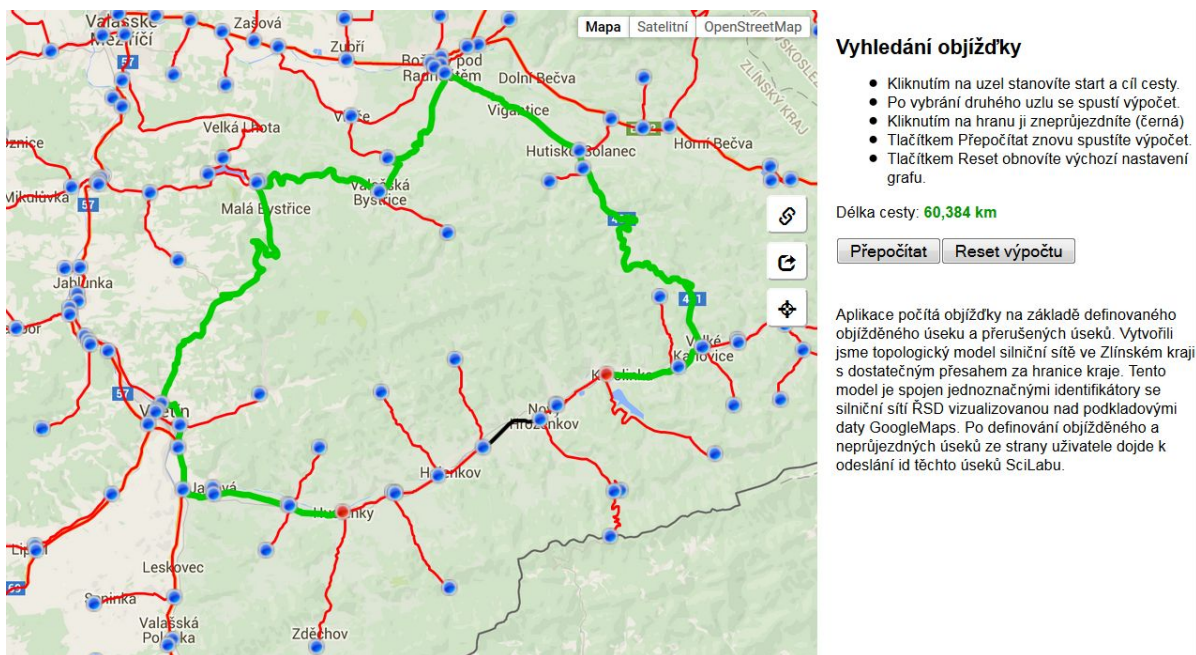
Obr. 31: Vizualizace databáze poškozených úseků silnic s vymezením pro rok 1997 a zobrazující absolutní počet přerušených úseků v jednotlivých okresech, zdroj: www.rupok.cz

- **Aplikace** – obsahuje příklady nasazení GIS v této problematice
 - **Povodeň 2013** – dynamická ukázka průběhu přerušení jednotlivých komunikací povodněmi, sesuvy či padajícími stromy v červnu 2013. Nová data o událostech na síti již totiž obsahují nejenom prostorovou, ale i časovou informaci. Můžeme tedy posléze animovat prostorový dopad události, ale též změny v čase, například průběh povodňové vlny (Obr. 32).



Obr. 32: Ukázka animace ze stránek www.rupok.cz. Znaky ukazují na místa aktuálních přerušeni a jejich bezprostřední příčinu, kterou je v tomto případě nejčastěji zatopení povodní. Ve spodní části je potom časová osa ukazující celkový aktuální počet přerušeni během povodně 2013.

- **Objížďky** – aplikace počítající nejlepší objíždné trasy při *vícečetném* přerušeni silniční sítě, které lze definovat uživatelem, nyní pouze pro Zlínský kraj. Uživatel si nejprve zvolí dva uzly, mezi kterými se má uskutečnit spojení po komunikaci. Vybrané uzly změní výběrem barvu z modré na červenou. Doporučená nejrychlejší trasa se vybarví zeleně. Uživatel má dále možnost manuálně vybrat úseky sítě, které budou neprůjezdné. Takové úseky se zbarví černě, přičemž je možné vybrat libovolné množství úseků. Ve výsledku se ukáže nejenom doporučená nejkratší trasa, pokud existuje, ale též její celková délka a podíl vzhledem k délce trasy nejkratší (Obr. 33).



Obr. 33: Ukázka modulu Objížďky s vyznačenou objížděnou trasou mezi červenými uzly. Výhodou této implementace je fakt, že se vyhledání spojení nevztahuje pouze k úsekům, ale lze vybrat libovolné dva uzly v síti.

Mimo uvedené aplikace na silniční síť, je součástí RUPOK také možnost hodnotit dopady a ohrožení na síti železnic. Tuto funkčnost zde však vzhledem k zaměření metodiky na síť silniční zde neprezentujeme. Zájemce odkazujeme na dokumentaci k software a na vlastní aplikaci www.rupok.cz.

Význam výsledků pro praxi

Význam aplikace výše uvedených algoritmů vidíme hlavně ve třech základních oblastech:

1. **Efektivnější řízení harmonogramu plánu uzavírek a rekonstrukčních prací.** Programy, založené na našich algoritmech a databázi výsledků získaných jejich použitím, jsou schopny identifikovat mezi navrhovanými uzavírkami takové případy, které by buď uvedly síť do kritického stavu, anebo ji tomuto stavu výrazně přiblížily, tj. stačí vlivem například přírodních procesů uzavřít jeden nebo dva úseky, aby se síť do nějakého kritického stavu dostala. Díky našim výsledkům těmto rizikovým situacím dokážeme předcházet.
2. **Analýza hrozeb silniční sítě v reálném čase.** V případě jakýchkoli přírodních procesů nebo událostí jsme schopni v síti identifikovat úseky, které je nutné udržet průjezdné za každou cenu, abychom zabránili dalšímu rozpadu sítě. Všechny prováděné výpočty se v těchto případech totiž velice zrychlují, neboť jsou aplikovány na části původní silniční sítě, které jsou výrazně menší.
3. **Hodnocení zranitelnosti stávajících sítí při zvažování strategií jejich postupného rozšiřování**
V tomto případě lze provádět analýzu zranitelnosti grafů, které odpovídají novým silničním sítím. Tyto silniční sítě vzniknou z původní silniční sítě přidáním jednoho nebo více úseků. Celá analýza nám pak podá obrázek o tom, zda přidané hrany zranitelnost silniční sítě snižují nebo naopak zvyšují.

Cílem všech tří výše uvedených oblastí je takový stav, aby dostupná silniční síť nabízela svým uživatelům maximální užitek, a to i v případě různých omezení způsobených plánovými uzavírkami. K tomu je potřeba zabezpečit optimální redundanci spojení pomocí vhodného návrhu topologické struktury sítě. Za tímto účelem byl autory této práce nedávno vyvinut též nový postup hodnocení robustnosti sítí a následné optimalizace při výběru nejvhodnější varianty nového spojení (Vodák a kol., 2015).

Závěr

Účelem této metodiky bylo představit nejnovější postupy a poznatky v oblasti zranitelnosti silniční sítě, které umožňují poskytovat operativní informace o tom, zda se silniční síť v konkrétním čase nachází poblíž nějakého svého kritického stavu. Dalším smyslem této metodiky bylo prezentovat vhodný nástroj pro fázi plánování oprav silniční sítě a pro vytváření strategií rozvoje území, například na úrovni kraje nebo i Ministerstva dopravy a případně také ŘSD, který umožní včasnou identifikaci kritických situací. Systém obsahující uvedené algoritmy může být implementován do prostředí RUPOK a využit nejenom na úrovni celostátní, ale rovněž může být omezen jenom pro území kraje. Neméně důležitým výsledkem této metodiky je možnost využít zmíněných algoritmů pro ex-post analýzy silniční sítě poškozené například přírodní katastrofou a v identifikaci životně důležitých úseků.

Srovnání novosti postupů uvedených v metodice

Většina zde uvedených postupů vychází z obecných síťových algoritmů. Některé z metod však byly autorským týmem vyvinuty v rámci projektu TRISK a publikovány v zahraničních časopisech. V České republice, ale i v mezinárodním srovnání, představují proto tyto postupy zcela nový pohled na hodnocení zranitelnosti sítí. Orgány zodpovědné za krizové řízení mají tedy jedinečnou možnost využít těchto progresivních přístupů pro zvýšení kvality státní služby. Rovněž aplikace RUPOK je svého druhu unikátním softwarem, který je dostupný veřejně a po registraci nabízí i další funkce pro orgány krizového řízení.

Přehled publikací autorského týmu s komentáři k novosti uvedených postupů. Metodika čerpá z uvedených publikací a představuje syntézu poznatků získaných za dobu řešení projektu TRISK.

Bíl, M., Vodák, R., 2013: Odolnost silniční sítě proti následkům katastrof. Silniční obzor 74, 176–179.

V této práci jsme se zabývali představením konceptu odolnosti silniční sítě proti jevům, které se objevují s malou pravděpodobností, ale mohou mít velké dopady.

Bíl, M., Sedoník, J., Kubeček, J., Vodák, R., Bílová, M., Andrášik, R., 2014: Rizikové úseky silniční sítě – analýza zranitelnosti a ohrožení přírodními pohromami. The Science For Population Protection 2, 1–19.

Přehledový článek pro českého čtenáře uvádějící do souvislosti hodnocení rizik pro silniční sítě s důrazem na přírodní pohromy.

Bíl, M., Vodák, R., 2014: The stochastic approach in road network vulnerability analysis. In: Nowakowski a kol. (Eds): Safety and Reliability: Methodology and Applications, 929–932.

Příspěvek, ve kterém jsme prvně představili návrh stochastického algoritmu pro identifikaci slabých úseků silniční sítě.

Křivánková, Z., Bíl, M., Vodák, R., Sedoník, J., 2015: Stanovení robustnosti silničních sítí a návrhy pro jejich zlepšení. Perner's Contacts 38, 105–118.

Článek v českém časopise, kdy jsme hodnotili robustnost silniční sítě pomocí jednoho čísla. Tento postup najde uplatnění ve fázi hodnocení odolnosti regionálních sítí.

Vodák, R., Bíl, M., Sedoník, J., 2015: Network Robustness and Random Processes. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications 428, 368–382.

Tato práce, publikována v předním fyzikálním časopise, představila nové postupy pro hodnocení robustnosti sítí a srovnání mezi sítěmi.

Bíl, M., Vodák, R., Kubeček, J., Bílová, M., Sedoník, J., 2015: Evaluating Road Network Damage Caused by Natural Disasters in the Czech Republic between 1997 and 2010. Transportation Research Part A: Policy and Practice 80, 90–103.

V článku se zabýváme zhodnocením dopadů vybraných nejhorších událostí – přírodních pohrom, které postihly Českou republiku v letech 1997–2010. Hodnocení probíhalo na síťové úrovni

jednotlivých krajů pomocí síťových metod. Jedná se první zpracování dopadů přírodních pohrom na silniční síť v České republice a použité metody, zejména vážený *Network Efficiency Index* (např. Latora a Marchiori, 2004), jsou vlastní inovací autorů.

Popis uplatnění metodiky

Metodika najde uplatnění v oblasti působnosti Ministerstva dopravy ČR jako nástroj pro úpravy koncepcí rozvoje dopravních sítí a dalšího rozvoje funkcionality JSDI v rámci NDIC.

Vzhledem k tomu, že k aplikaci algoritmů zde uvedených lze použít též platformy RUPOK, je možné, aby takový nástroj využívaly i jednotlivé krajské úřady. Analyzovaná silniční síť by se potom omezila s logickým přesahem na území daného kraje.

Metody hodnocení zranitelnosti sítí lze využít i mimo území České republiky, nebo v případě přeshraniční spolupráce mezi příhraničními regiony.

Ekonomické aspekty metodiky

Vyčíslit dopady přerušení komunikací je nesnadné. Musíme totiž mít na mysli fakt, že se v tomto případě nejedná o náklady přímé, ale výhradně nepřímé (viz příslušná kapitola k nepřímým dopadům přerušení úseků). Přímým dopadům nelze pomocí této metodiky zabránit, nicméně je možné redukovat náklady nepřímé.

Jak plyne z literatury, nepřímé náklady mohou být někdy i vyšší než náklady přímé, zejména pokud dojde k odříznutí území od zbytku sítě, případně k nutnosti zajistit náhradní spojení po dlouhých objízdných trasách.

Odříznutí části území od hlavní sítě představuje velmi závažný stav. Pomocí postupů zde uvedených je možné snížit pravděpodobnost, že k takové události dojde. Domníváme se, že tento přínos je významný a zřejmý, přestože jej nelze jednoznačně kvantifikovat.

Literatura

Andrášik, R., Bíl, M., (v redakci): A New Method for Efficient Road Curvature Analysis, *Journal of Geographical Systems*

Bíl, M., Kubeček, J., Andrášik, R., 2014: An Epidemiological Approach to Determining the Risk of Road Damage due to Landslides. *Natural Hazards* 73 (4), 1323–1335.

Bíl, M., Andrášik, R., Zahradníček, P., Kubeček, J., Sedoník, J., Štěpánek, P., 2015: Total water content thresholds for shallow landslides, Outer Western Carpathians. *Landslides*.

Bogenreif, C., Souleyrette, R. R. & Hans, Z., 2012: Identifying and Measuring Horizontal Curves and Related Effects on Highway Safety, *Journal of Transportation Safety & Security* 4(3), 179–192.

Findley, D. J., Zegeer, Ch. V., Sundstrom, C. A., Hummer, J. E., Rasdorf, W. & Fowler, T. J., 2012: Finding and Measuring Horizontal Curves in a Large Highway Network: A GIS Approach, *Public Works Management & Policy* 17(2), 189–211.

Fuks, D. B. & Tabachnikov, S., 2007: *Mathematical Omnibus: Thirty Lectures on Classic Mathematics*, American Mathematical Society, USA.

Jenelius, E., Petersen, T., Mattsson, L.G., 2006: Importance and exposure in road network vulnerability analysis. *Transportation Research Part A* 40, 537–560.

Krejčí, O., Baroň, I., Bíl, M., Hubatka, F., Jurová, Z., Kirchner, K., 2002: Slope movements in the Flysch Carpathians of Eastern Czech Rep. Triggered by Extreme Rainfalls in 1997: a Case Study. *Phys. Chem. Earth*. 27 (36), 1567–1576.

Rasdorf, W., Findley, D. J., Zegeer, Ch. V., Sundstrom, C. A. & Hummer, J. E., 2012: Evaluation of GIS Applications for Horizontal Curve Data Collection, *Journal of Computing in Civil Engineering* 26(2), 191–203.

Spall, J.C., 2003: Stochastic search, optimization, and the simultaneous perturbation algorithm – a tutorial. In: Hexmoor, H (Ed.) *International Conference on Integration of Knowledge Intensive Multi-Agent Systems*.

Taleb, N. N., 2014: *Antifragilita: jak těžit z nahodilosti, neurčitosti a chaosu*. ISBN 978-80-7432-498-7

Taylor, M. P., Sekhar, S. V. C., D'Este, G. M., 2006: Application of Accessibility Based Methods for Vulnerability Analysis of Strategic Road Networks. *Netw Spat Econ* 6, 267–291.

Vodák, R., Bíl, M., Sedoník, J., 2015: Network Robustness and Random Processes. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 428, 368–382.

Vodák, R., Bíl, M., Svoboda, T., Křivánková, Z., Rebok, T., Hliněný, P., (v tisku): A Novel Method for Rapid Identification of Road Links Causing Network Break-Up. *European Journal of Operational Research*.

Yee, A., Leung, S.K., Wesemann, L., 1996: The 1994 Northridge earthquake: a transport impact overview. *Transportation Research Circular* 462, 7–19.

Seznam publikací autorského týmu, které předcházely metodice

Bíl, M., Vodák, R., 2013: Odolnost silniční sítě proti následkům katastrof. *Silniční obzor* 74, 176–179.

Bíl, M., Kubeček, J., Andrášik, R., 2014: An Epidemiological Approach to Determining the Risk of Road Damage due to Landslides. *Natural Hazards* 73 (4), 1323–1335.

Bíl, M., Sedoník, J., Kubeček, J., Vodák, R., Bílová, M., Andrášik, R., 2014: Rizikové úseky silniční sítě – analýza zranitelnosti a ohrožení přírodními pohromami. *The Science For Population Protection* 2, 1–19.

Křivánková, Z., Bíl, M., Vodák, R., Sedoník, J., 2015: Stanovení robustnosti silničních sítí a návrhy pro jejich zlepšení. *Perner's Contacts* 38, 105–118.

Vodák, R., Bíl, M., Sedoník, J., 2015: Network Robustness and Random Processes. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 428, 368–382.

Bíl, M., Vodák, R., Kubeček, J., Bílová, M., Sedoník, J., 2015: Evaluating Road Network Damage Caused by Natural Disasters in the Czech Republic between 1997 and 2010. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 80, 90–103.

ISBN 978-80-88074-18-2