

Odolnost silniční sítě proti následkům katastrof



RNDr. Michal Bíl, Ph.D.

Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.
divize bezpečnosti a dopravního inženýrství



RNDr. Rostislav Vodák, Ph.D.

Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.
divize bezpečnosti a dopravního inženýrství

Moderní společnost je závislá na sítích mnoha druhů. Mezi nimi je v popředí síť silnic, jejíž spolehlivé fungování je důležité pro řadu odvětví lidské činnosti. Událostmi, které mohou silniční síť citelně zasáhnout, jsou například přírodní pohromy. Měření dopadu událostí, které mají schopnost přerušit úseky komunikací a negativně ovlivnit výkonnost sítě, stejně jako úvahy o možné prevenci, jsou náplní dalšího textu.

[Klíčová slova: silniční síť, robustnost, zranitelnost, optimalizace, přírodní pohromy]

Modern society depends on various network types. Among these types for many human activities the road network appears as a foremost important one. For example, natural disasters can ponderably interfere with a road network. Evaluation of disaster consequences possessing the ability of road section interruptions and thus the road net efficiency lowering as well as consideration of possible preventive actions form the content of this article.

[Keywords: road network, robustness, vulnerability, optimization, natural disasters]

Propojený svět

V posledních letech se do popředí zájmu nejenom vědeckého světa dostávají sítě. Je to způsobeno mimo jiné tím, jak se s růstem poznání přírodních i společenských procesů, stává systém vzájemných vazeb mezi objekty nebo procesy složitějším (např. [1], [2]). Sítě jsou totiž rozprostřeny nejen všude okolo nás, ale i v nás samotných. Ať již se jedná o telekomunikační spojení, anebo systémy fungování organismů na molekulární úrovni.

V globalizovaném světě jsme závislí na tocích zboží a informací. Avšak ještě před 100 lety se většina lidí po celý svůj život pohybovala v poměrně malém okruhu kolem svého bydliště, kde obvykle i pracovala. Lidé jedli potraviny vypěstované v blízkém okolí, které byly jen zřídka doplněny zbožím z větší vzdálenosti. Přeprava zboží byla omezena na trvanlivé potraviny a zboží místně nedostupné. Vše na bázi dřeva a kovů, co bylo možné vyrobit nedaleko, nemělo smysl dovážet z větší vzdálenosti. Mezikontinentální doprava byla vyhrazena pro vzácné komodity, např. čaj, koření, hedvábí, kávu apod. Tato situace se ale začala rapidně měnit počátkem 20. století, a to zejména s objevením ropy jako zdroje levné energie. V současné době už nikoho nepřekvapí, že si v supermarketu může koupit rajčata ze Španělska apod. Základem všeho jsou kromě levné energie i silniční sítě.

Silniční sítě

V rámci českých zemí se nejprve utvářela síť silnic, mnohem později následovala síť železnic. První silnice začaly tvořit významnou síť teprve tehdy, když byl jejich povrch zpevněn do té míry, že byly schopny nabídnout svým uživatelům relativně rychlé a spolehlivé spojení.

V našich podmínkách byl základem silniční sítě systém starých cest, které se postupně rozšiřovaly a napřimovaly. Až když přestaly vyhovovat, přistoupilo se ke stavbě nových komunikací, které byly schopny jednak pojmut větší objem dopravy a jednak zajistit rychlý pohyb po kvalitním povrchu.

V následujícím textu se budeme zabývat otázkami robustnosti a zranitelnosti silniční sítě. Pod pojmem robustnosti silniční sítě budeme rozumět odolnost sítě vůči náhodným

událostem. Zranitelnost silniční sítě znamená, že se v síti snažíme identifikovat hrany, jejichž zneprůjezdnění bude mít na síť v jistém smyslu největší dopad. Nebude nás tedy zajímat kvalita povrchu nebo jiné technické parametry vozovek, ale pouze existence a délka spojení, které silnice zajišťují. K tomu je také potřeba přistoupit k jistému zjednodušení, které spočívá v reprezentaci silniční sítě pomocí grafu, kde jednotlivé úseky silnic budeme nazývat hranami a křižovatky uzly (např. [3]).

Analýza silniční sítě je z celého spektra studia komplexních sítí tou z jednodušších. Je to dáno tím, že se pohybujeme ve více méně dvojrozměrném prostoru a také tím, že rozdíl mezi počtem hran, které vycházejí z jednotlivých uzlů, není obvykle větší než jeden řád. Naopak popis systému letecké dopravy může být komplikovanější, protože počet hran – spojení mezi letišti, není stálý a existuje rozdíl až několik řádů mezi počtem spojů největšího a nejmenšího letiště. Přesto všechno jsou alespoň letištní uzly stálé v prostoru a čase. Nové sítě, např. síťová spojení za pomoci mobilních zařízení, jsou proměnlivé v obou doménách.

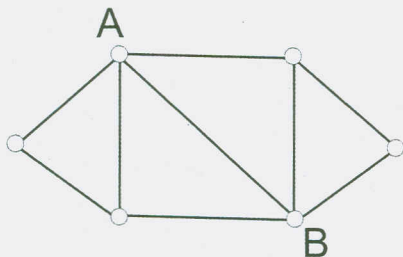
Přírodní pohromy a poškození silniční sítě

Přírodní pohromy, v našich podmínkách nejčastěji povodně [4] nebo sesuvy [5], mají schopnost přerušit nikoliv pouze jeden nebo několik málo úseků silniční sítě, ale značné množství úseků naráz. Např. z množiny 974 úseků silniční sítě Zlínského kraje jsme identifikovali 121 úseků (12 %), které byly přerušeny nebo významně poškozeny v důsledku povodní a sesuvů, které vznikly jako následek extrémních srážek z července 1997 [6].

Vlastností přírodních pohrom je, že mají obvykle velký rozsah a intenzitu, a že nelze dopředu odhadnout, které části sítě postihnou. Abychom mohli hodnotit dopad různých pohrom na různé sítě, je třeba si nejprve stanovit míry, pomocí kterých je budeme srovnávat.

V případě povodní lze jednoduše vymezit neprůjezdné hrany analýzou v GIS (geografický informační systém), kdy provedeme průnik polygonu zaplaveného území a silniční sítě. Daleko hůře ale budeme schopni vyjádřit dopad takto identi-

fikovaných úseků na síť jako celek. Totéž platí i pro případ dalších více či méně pravděpodobných událostí, které vedou k přerušení dvou nebo více hran v síti. Je to tím, že síť představují systém, který je schopen fungovat (poskytovat službu, což je v našem případě spojení) i při současném poškození několika hran (obr. 1).



Obr. 1 Příklad robustní a redundantní sítě. Mezi uzly A a B je několik cest, takže případné přerušení jedné nebo dvou hran v jednom okamžiku nezpůsobí problém s dostupností koncových uzlů.

Měříme dopad pohrom

Dříve než přistoupíme k měření dopadu pohrom, musíme si rozmyslet, zda chceme měřit zranitelnost sítě nebo její robustnost.

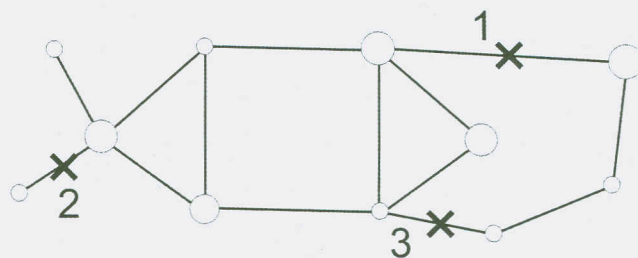
Podívejme se nejdříve na zranitelnost sítě. V tomto případě se snažíme zhodnotit, jak velký dopad má reálná anebo fiktivní pohroma na celou síť. Jelikož se jedná o relativní hodnocení, je třeba srovnat výkon sítě bez porušení a síť poškozená. Mezi mnoha přístupy [2] jsme pro názornost vybrali tzv. *network efficiency index* (V_i), který publikovali Latora a Marchiori [7]. Při výpočtu tohoto indexu se sečtou převrácené hodnoty počtu hran na nejkratších cestách mezi všemi uzly v dané síti, a to jak pro nepoškozenou, tak pro poškozenou síť. Čím jsou tato dvě čísla odlišnější, tím větší poškození sítě nastalo. Pokud rozdíl těchto dvou čísel vydělíme hodnotou pro nepoškozenou síť, pak výsledné číslo, které leží mezi 0 a 1, lze interpretovat jako procentuální zhoršení funkčnosti sítě. Výhodou tohoto indexu je, že ho lze použít i na katastrofický scénář, kdy se síť rozpadne na více izolovaných částí – komponent. V tomto případě jsou délky neprůjezdných hran nastaveny na nekonečno.

Druhou možností je pokusit se vyčíslit robustnost silniční sítě, tj. její odolnost vůči všem možným katastrofám, kterým přiřazujeme stejnou pravděpodobnost výskytu, protože pro výpočet těchto pravděpodobností pro různé události nemáme dostatečné množství informací. Navíc můžeme srovnávat robustnost sítí i mezi sebou navzájem. Robustnost sítě lze zkoumat z několika stran. Nejprve můžeme posoudit pohled čistě topologický, což znamená zhodnotit počet sousedů, resp. počet spojení vedoucích z/do každého uzlu sítě. Vzhledem k tomu, že délka spojení je v pozemní dopravě důležitým parametrem, lze tento topologický pohled rozšířit o délky úseků. Další úroveň přiblížení pohybu v síti mohou představovat různá omezení, například maximální nosnosti mostů na trase, světlé výšky podjezdů, apod. Další možností, jak ohodnotit robustnost sítě vůči katastrofickým scénářům, které vedou k rozpadu sítě na více komponent, je počítat střední hodnotu počtu komponent, které vzniknou zneprůjezdněním jedné hrany. Protože zneprůjezdněním jedné hrany mohou

vzniknout nejvýše dvě komponenty, výsledné číslo leží mezi 0 a 1. Čím blíže je výsledné číslo 0, tím je síť robustnější.

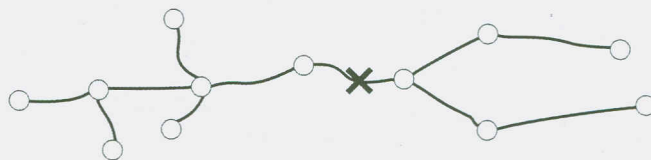
Odstraňování následků přírodních katastrof

Je zřejmé, že katastrofický scénář zahrnující rozpad silniční sítě na více komponent je pro tuto síť klíčový a proto se na něj podíváme blíže. Pokud totiž dojde k rozpadu sítě na komponenty, pak je vysoce žádoucí co nejdříve zajistit propojení těchto izolovaných částí s hlavní částí sítě, ze které lze poskytovat pomoc, např. dodávky potravin a energií. V případě události podobného rozsahu jako v roce 1997 však stojíme před úkolem opravit řádově desítky úseků, což není možné provést v dostatečně krátké době. Je tedy třeba stanovit priority. Prioritami může být například počet obyvatel, kteří zůstali izolováni. Musíme tedy stanovit pořadí, které určí sled prací na zprovoznění přerušených úseků (obr. 2).



Obr. 2 Příklad přerušení úseků na hypotetické síti. Čísla ukazují pořadí, ve kterém je optimální provádět opravy, aby bylo dodrženo pravidlo připojovat komponenty, resp. uzly, s největším počtem lidí. Velikost uzlu ukazuje proporčně na počet obyvatel.

Událost takového rozsahu má vždy značný dopad, a nejinak tomu bylo i v případě roku 1997. Mnohem závažnější ale je situace, kdy k významnému zhoršení vlastností sítě dojde při přerušení velmi malého počtu úseků. Extrémní případem, který si lze představit, je síť charakteru stromu, kdy přerušení jakéhokoliv úseku znamená okamžitý rozpad sítě na dvě komponenty (obr. 3).



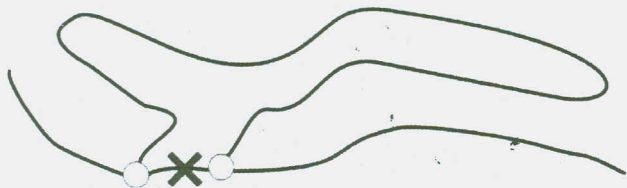
Obr. 3 Příklad vysoce zranitelné sítě, kdy přerušení kterékoliv hrany způsobí její rozpad na dvě komponenty

Je tedy mimořádně důležité identifikovat v síti ty hrany, které v nejmenším možném počtu způsobí rozpad sítě na dvě a více komponent. Situace je opět tím horší, čím více lidí zůstane izolováno od hlavní sítě.

Zmírnění dopadů přírodních pohrom

Přírodní pohroma velkého rozsahu téměř vždy způsobí také velké problémy v zajištění obslužnosti území. Dobře navržená síť se však s nimi bude vypořádávat lépe, než síť nedostatečně robustní. Jak již víme, robustní síť jsou takové, které jsou schopny plnit obslužnou funkci i při částečném poškození. V případě silniční sítě by se jednalo o stav, kdy jsou přerušeny některé z úseků, ale existence objízdných tras akceptovatelné délky zaručuje, že spojení mezi uzly nebylo přerušeno a pro-

voz může probíhat, i když s jistými omezeními, např. prodloužením jízdní doby (obr. 4). Zmírnit dopady různých druhů katastrof můžeme například tím, že v síti propojíme dosud nepropojené uzly.



Obr. 4 Příklad přerušeného úseku s existující obíždnou trasou, která ale nemusí být vzhledem ke své délce akceptovatelná pro všechny účely

Výhodou předchozího konceptu je, že jako výsledek dostaneme síť, která je v průměru odolnější proti všem druhům katastrof. Nevýhodou je, že jedna z těchto katastrof může mít pro síť fatální následky, neboť může zasáhnout jen ty hrany, jejichž zneprůjezdněním vzniknou v síti největší škody.

Je tedy logické hledat v síti takové hrany, jejichž odstranění způsobí největší škody reprezentované největším nárůstem koeficientu V_t . Výsledkem bude číslo, které bude u každé z hran sítě ukazovat na dopad události, pokud by se právě tato hrana přerušila. Cílem v tomto případě musí být zajištění rozumného alternativního spojení v síti, které nevyužívá tuto hranu.

Ve větších sítích lze však očekávat, že může dojít k současnému přerušení většího počtu hran. Příčiny přerušení mohou být různé, nejčastěji půjde o náhodu, ale může za tím být i plánovaný útok nebo přírodní pohroma. Nejhorší scénář představuje napadení informovaným útočníkem, který je schopen udeřit na kritických místech sítě. Může tak způsobit maximální škody s minimálními náklady. Pro správce sítě je pak velmi cenné, pokud dopředu ví, které hrany to jsou, a může přijmout odpovídající opatření.

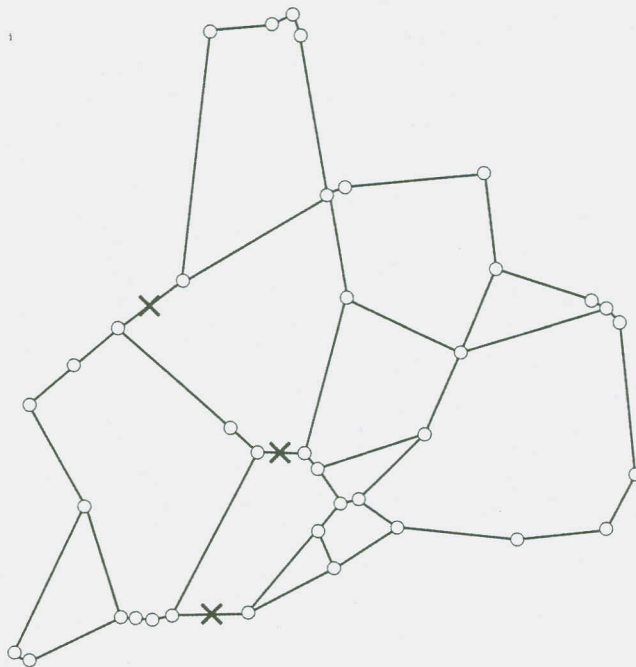
Připravenost na kritické situace

Ochranou a preventivním opatřením proti náhodným přerušením úseků sítě je identifikace kritických hran, které, jsou-li odstraněny současně, způsobí největší škody, a analýza robustnosti sítě. Problém spočívá v tom, že pro nalezení těchto kritických hran je nutné projít všechny možné kombinace hran v síti. Přestože algoritmy na tento druh výpočtů jsou známy (např. [8], [9]), jejich extrémní časová náročnost neumožňuje dosažení vyššího počtu současně přerušených hran. Pro síť s rozsahem 1 000 hran (což je rozsah silniční sítě průměrného kraje v ČR) je již výpočet všech kombinací 4 současně přerušených hran za mezí dostupné doby pro běžný počítač. Řešením je buď využití výkonnějších výpočetních zařízení a paralelizace výpočtů nebo užití jiného přístupu, který nebude přísně deterministický, ale bude obsahovat prvky náhody [10]. Daní za náhodný způsob identifikace těchto hran je potom skutečnost, že se nám pravděpodobně nepodaří najít nejhorší variantu, ale jenom variantu patřící mezi dostatečně špatné.

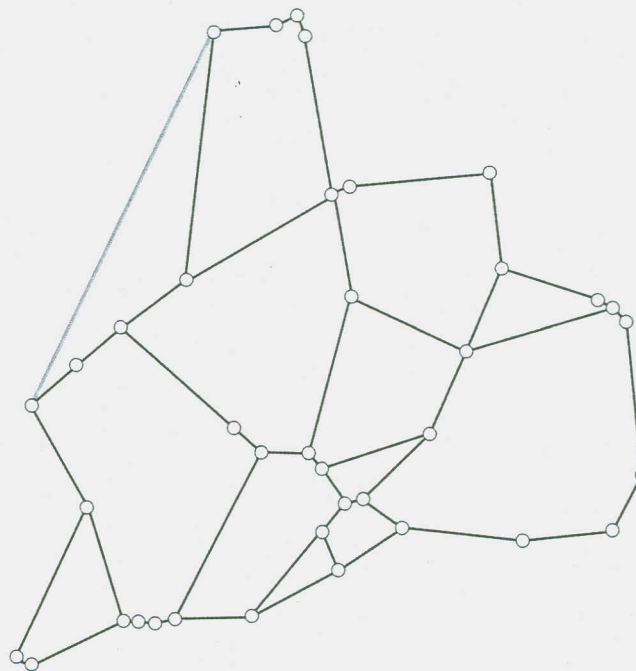
V rámci projektu TRISK (VG20102015057), který aktuálně řeší Centrum dopravního výzkumu v rámci Bezpečnostního výzkumu Ministerstva vnitra ČR, byly pro hodnocení odol-

nosti sítě proti poškození vyvinuty algoritmy, které jsou schopny:

- identifikovat slabé články sítě,
- navrhovat ideální rozšíření sítě tak, aby se co nejvíce zlepšila jejich robustnost a
- rozhodnout o nejvhodnějším postupu propojování sítě, která se vlivem katastrofy rozpadne na více komponent.



Obr. 5 Identifikace nejslabší trojice úseků v hypotetické síti, které, jsou-li přerušeny současně, způsobí maximální škody



Obr. 6 Hypotetická silniční síť, doplněná jednou hranou tak, aby se maximálně zvýšila její celková odolnost

Na příkladu hypotetické sítě na obr. 5 ukazujeme identifikaci hran, jejichž zneprůjezdněním vzniknou dvě přibližně stejně velké komponenty, a na obr. 6 navržené spojení dvojice

uzlů, které maximalizuje robustnost sítě vůči všem možným katastrofickým událostem.

Závěr

Dříve nebo později bude téměř každé území zasaženo přírodní nebo jinou katastrofou. V rámci prevence se však můžeme předem připravit. Zvyšování odolnosti silniční sítě je nicméně náročný proces, zejména pokud je jeho součástí výstavba nových nebo přebudování stávajících komunikací. Identifikaci slabých článků současné silniční nebo jiných sítí lze však provádět již nyní. Konkrétní příklady nejslabších míst na síti ČR však z pochopitelných důvodů neuvádíme.

Výsledkem hodnocení rizika, tj. vztahu mezi pravděpodobností vzniku pohromy očekávané intenzity, rozsahu a dopadu této pohromy na společnost, je množina scénářů. Nejzá-

važnější rizika musíme ihned eliminovat nebo nedopustit, aby vznikla. Naopak někdy nelze, než riziko akceptovat. V případě silniční sítě se jedná například o území, do kterých vede pouze jedna komunikace. Její přerušení vždy způsobí izolování části území od zbytku sítě.

Mimo přírodní pohromy existují i události, které jsou rozsahem řádově menší, ale mohou mít srovnatelné následky. Proto je nutné předem identifikovat kritické hrany v síti a připravit alternativní objízdné trasy nebo adekvátní scénáře reakcí na události. S těmito jevy by měl také počítat plán opravy úseků silnic, aby nenastaly situace, kdy budou v jeden okamžik prováděné opravy kritických úseků komunikací.

Příspěvek vznikl za podpory projektu TRISK - VG20102015057 - Kvantifikace rizika ohrožení dopravní infrastruktury České republiky přírodními hazardy, poskytnutého v rámci Programu bezpečnostního výzkumu České republiky v letech 2010–2015.

Literatura

- [1] Barabási, A., L., 2005. V pavučině sítí. Paseka, Praha, 280 s.
- [2] Newman, M., 2010. Networks – An Introduction, Oxford University Press, 720 s.
- [3] Demel, J., 1991. Teorie grafů, ČVUT, Praha, 200 s.
- [4] Brázdil, R., Kirchner, K. a kol., 2007. Vybrané přírodní extrémy a jejich dopady na Moravě a ve Slezsku. MU Brno, ČHMÚ Praha, ÚGN AV ČR, v.v.i. Ostrava, 431 s.
- [5] Záruba, Q., Mencl, V., 1969. Sesuvy a zabezpečování svahů, Nakladatelství ČSAV, Praha, 224 s.
- [6] 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, 1567-1576.
- [7] Latora, V., Marchiori, M., 2004. How the science of complex networks can help developing strategies against terrorism, [J]. Chaos, Solitons and Fractals, 20, 1, 69-75.
- [8] Dijkstra, E. W., 1959. A note on two problems in connexion with graphs. Numerische Mathematik 1, 269–271.
- [9] Töpfer, P., 1995. Algoritmy a programovací techniky, 2. vydání, Prometheus, Praha, 300 s.
- [10] Spall, J. C., 2003. Introduction to stochastic search and optimization: Estimation, simulation, and control, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 618 s.

Lektorský komentář

Je jistě užitečné, že se bezpečnostní výzkum Ministerstva vnitra zabývá zvýšením odolnosti (řekněme „robustnosti“) dopravní infrastruktury a bylo by ještě užitečnější, kdyby byly vytypovány a z odolňovány spolehlivé a bezpečně provozovatelné páteřní trasy, jejichž hlavním kritériem by byla nízká zranitelnost vůči předvídatelným rizikům, a které by měly navíc alternativu.

Po teroristickém útoku na USA 11. září 2001 byla v květnu 2002 pro americký State Department of Transportation zpracována řada praktických doporučení a směrnic ve spolupráci NCHRP (National Cooperative Highway Research Program), AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) a DOT (State Department of Transportation), jako např. „Směrnice pro hodnocení zranitelnosti silniční infrastruktury, identifikaci kritických míst a jejich ochranu“. Tyto směrnice velmi podrobně definovaly metody hodnocení a identifikování takzvané „Kritické dopravní infrastruktury“. Na vzniklou zkušenost reagovala EU dokumentem (20/10/2004 Sdělení Komise Evropské radě a parlamentu), který řadí do kritické infrastruktury oblasti energie, telekomunikace, bankovní a finanční sektor, zdravotní péči, zásobování vodou a potravinami, dopravu, produkci a zacházení s nebezpečným materiálem, sektor státní správy, informační strukturu a řídicí systémy.

V roce 2005 zadala Grantová agentura ČR grantový projekt č. GA 103/05/0604 „Odolnost umělých staveb proti rozrušení dopravní infrastruktury území náhodnými či záměrnými činy“. Výstup grantového projektu „Metodická příručka pro veřejnou správu – postup určení kritických prvků silniční infrastruktury a jejich rizik“ v roce 2007 hodnotil druhy hrozeb a zejména ohrožení infrastruktury i z hledisek zranitelnosti, obtížnosti a časové náročnosti odstranění poškození i z hlediska metody hodnocení dostupných a adekvátních náhradních tras. A to si nemyslím, že to byla jediná práce v této problematice.

Živelné pohromy posledních let ukazují na slabá místa infrastruktury – metro, odolné proti jadernému napadení, avšak zaplavené vodou vysokou rychlostí, Praha závislá na jednom mostě (nyní díky SOKP již na dvou), propojení městských částí jen pomocí železniční dopravy atd. Je evidentní, že v České republice hrozí velké vody, sesuvy, technické havárie konstrukcí, nedej bože cílený teroristický útok na citelný a zranitelný uzel. Každý územní celek by měl v rámci svého plánu krizového řízení ověřit, jak odolná nebo naopak zranitelná je jeho dopravní infrastruktura. Příkladem budiž alpská údolí, závislá na lavinovém nebezpečí a jednom nebo dvou připojeních. Dálnice D8, na které byly při obou povodních škody vedoucí k přerušení provozu. Dálnice v Bavorsku, zaplavené na kritických místech povodní z Innu a z Dunaje. Při výstavbě nové dopravní infrastruktury by hodnotícím kritériem měl být nejen dopad na životní prostředí, ale bezpečnost, spolehlivost a odolnost haváriím. Znamá místa, kde rychlostní silnici po přivalovém dešti opakovaně zavalí bláto a proud vody z pole. V různých zemích světa jsem viděl staré silnice, které živelným pohromám odolaly a jejich nové moderní náhrady, které živel nemilosrdně odnesl. Poznatky teoretické i praktické jsou k dispozici, jen je převést do praktického života!

Ing. Jiří Landa
AF-CITYPLAN s.r.o.