

# Vliv faktorů na poskytovaný výkon kritických prvků pozemní dopravní infrastruktury

**David PATRMAN**

Fakulta bezpečnostního inženýrství, VŠB-TU Ostrava  
Lumírova 630/13, 700 30, Ostrava, Česká republika  
david.patрман@vsb.cz

**Abstrakt:** *Primárním cílem infrastruktury pozemní dopravy je poskytování nezbytných služeb pro fungování společnosti. Vytížení silničních či železničních staveb (tj. prvky pozemní dopravní infrastruktury), s rozvojem vyspělých států a z toho plynoucí potřeby přepravy stále vyššího počtu osob a zboží, každoročně narůstá. Narušení či selhání těchto prvků může mít vážné dopady na společnost. Míra dopadů se odvíjí od územní významnosti prvků. Významnost prvků je definována úrovní výkonu, který poskytují (tj. jejich dopravní propustnosti a intenzity), přičemž samotný výkon je ovlivňován negativními a pozitivními faktory. Cílem článku je integrální vymezení a deskripce faktorů, které negativně i pozitivně ovlivňují výkon kritických prvků pozemní dopravní infrastruktury.*  
**Klíčová slova:** *dopravní infrastruktura, kritická infrastruktura, kritické prvky, výkon, narušení*

## 1 Úvod

Doprava je jedním z odvětví evropské kritické infrastruktury (European Council, 2008). Jeho subskupinou je infrastruktura pozemní dopravy, která je tvořena jednotlivými prvky, z nichž některé jsou natolik významné, že jejich selhání by způsobilo dopravní kolaps (Jenelius, 2007). Tyto prvky jsou označovány jako kritické. Každý takovýto prvek poskytuje určitou úroveň výkonu, která je definována dopravní propustností a intenzitou dopravy (Banister a Stead, 2002). Tento výkon může být ovlivňován negativními, ale také pozitivními faktory (Rehak et al., 2018a). Zatímco za negativní faktory lze jednoznačně považovat veškeré nežádoucí události narušující výkon, významným pozitivním faktorem je resilience těchto prvků.

Stávající odborné publikace se zabývají modelováním výkonnosti dopravních prvků při jejich narušení ze dvou úhlů pohledu. První z nich je pokles výkonnosti v kontextu působení negativních faktorů, tj. narušení těchto prvků (např. Dvorak et al., 2017; Davies et al., 2017). Druhý přístup je zaměřen na pozitivní faktory, tj. preventivní opatření k minimalizaci pravděpodobnosti narušení výkonu těchto prvků (např. Karamlou a Bocchini, 2014; Leviakangas a Aapaoja, 2015). V současné době však neexistuje komplexní přístup reflektující obě skupiny faktorů v jednom celku. Na základě toho článek přináší integrální vymezení a deskripci faktorů ovlivňujících výkon kritických prvků pozemní dopravní infrastruktury.

## 2 Deskripce kritických prvků pozemní dopravní infrastruktury

Pozemní doprava tvoří významnou subskupinu dopravy. Její součástí je doprava silniční a železniční. Silniční doprava se dále člení na dopravu osobní a nákladní, přičemž osobní doprava v sobě zahrnuje různé způsoby dopravy, vycházející z užitého dopravního prostředku (např. individuální automobilová, hromadná nebo cyklistická). Železniční dopravu je rovněž možno rozdělit na osobní a nákladní.

K realizaci přepravy, coby samotnému výsledku dopravní činnosti, napomáhá dopravní infrastruktura. Nařízení Komise evropských společenství (European Commission, 2006) uvádí dopravní infrastrukturu jako všechny komunikace a pevná zařízení tří oborů dopravy, které jsou nezbytné pro provoz vozidel a bezpečnost tohoto provozu. Tuto infrastrukturu je možno rozdělit dle typu stavby na liniové, bodové a plošné prvky (Rehak et al., 2016).

Mezi liniové prvky se v rámci silniční dopravy řadí pozemní komunikace. Klasifikace těchto komunikací je v Evropě nejednotná, nicméně lze konstatovat, že obecně se dělí na dálnice, rychlostní komunikace a ostatní silnice. Do kategorie bodových prvků spadají např. mosty, tunely nebo křižovatky, propojující liniové prvky. Příkladem plošného prvku mohou být složitější tunelové komplexy tvořené několika tubusy a mimoúrovňovými křižovatkami (např. tunel Blanka v Praze).

V oblasti železniční infrastruktury se liniovými prvky rozumí železniční dráhy, které jsou, stejně jako v případě silniční dopravy, rozděleny do různých kategorií (tj. mezinárodní koridory, celostátní dráhy a regionální dráhy). Bodovými prvky železnic jsou poté např. tunely, mosty nebo železniční zastávky. Mezi plošné prvky je možno zařadit např. železniční uzly nebo velké železniční stanice, které jsou tvořeny několika bodovými prvky.

V rámci dopravní infrastruktury se některé prvky označují za kritické. Jedná se o prvky, které jsou pro chod systému důležité takovým způsobem, že jejich nefunkčnost by měla závažné dopady na daný systém (Robins et al., 1998; Fekete, 2011). Závažnými dopady je zde míněno narušení výkonu daného prvku. Za kritické prvky lze v oblasti silniční dopravy považovat zejména dálnice, tunely a mosty a významné mimoúrovňové křižovatky. Kritickými prvky železniční dopravy mohou být zejména mezinárodní koridory, tunely, mosty a významné železniční uzly.

K hodnocení úrovně kritičnosti prvků v oblasti pozemní dopravní infrastruktury je v současné době využívána řada specifických nástrojů a metod. Některé z těchto metod jsou určeny k hodnocení kritičnosti prvků jak v silniční, tak železniční dopravě (např. Zhang et al., 2015; Dvorak et al., 2017). Vedle těchto nástrojů existují také specifické metody zaměřené buď na hodnocení kritických prvků v oblasti silniční dopravy (např. Valenzuela et al., 2017; Hartmann a Ling, 2016) nebo železniční dopravy (např. European Railway Agency, 2009; Slivkova et al., 2018).

### **3 Výkon prvků pozemní dopravní infrastruktury a jejich narušení**

V rámci pozemní dopravy lze sledovat a vyhodnocovat výkon ve dvou základních oblastech. První představuje přepravní výkon dopravních prostředků, který je hodnocen u osobní a nákladní dopravy. U osobní dopravy výkon představuje přepravu jedné osoby na vzdálenost jednoho kilometru. Vypočítá se jako součin dopravního výkonu (tedy vzdálenosti, kterou ujede daný dopravní prostředek) a počtu přepravených osob [pkm]. U nákladní dopravy představuje přepravu jedné tuny zboží na jeden kilometr. Vypočítá se jako součin dopravního výkonu a hmotnosti nákladu [tkm] (Ramanathan, 2004).

Druhou oblastí jsou dopravní stavby, u kterých je hodnocena jejich dopravní propustnost (tj. kapacita) a intenzita dopravy. V oblasti pozemní dopravy jsou propustnost a intenzita stanovovány pro silnice, železnice, tunely nebo mosty. Propustnost i intenzita provozu jsou ústředním konceptem pro konstrukci a řízení dopravy. Díky těmto veličinám je možné předvídat časy a místa přetížení či odhadnout zpoždění. Z tohoto důvodu je potřeba, aby propustnost i intenzita byly měřitelné a jasně definované (Transport for London, 2013).

U silniční dopravy je propustnost/kapacita definována jako maximální udržitelný průjezd provozu za určitý časový úsek za daných silničních a dopravních podmínek. Podle svého účelu může být klasifikována na návrhovou, strategickou nebo provozní kapacitu (Haseeb, 2017). Na železničních tratích je propustnost daného úseku definována za účelem zjištění maximálního množství vlaků, které mohou být ve všech směrech trvale a plynule prováženy, a to zpravidla za 24 hodin (Boysen, 2012; Bulicek, 2011). Oproti tomu intenzita vyjadřuje počet vozidel, která jsou schopna projet daným úsekem komunikace za jednotku času (Cools et al., 2010; Ledvinova, 2008).

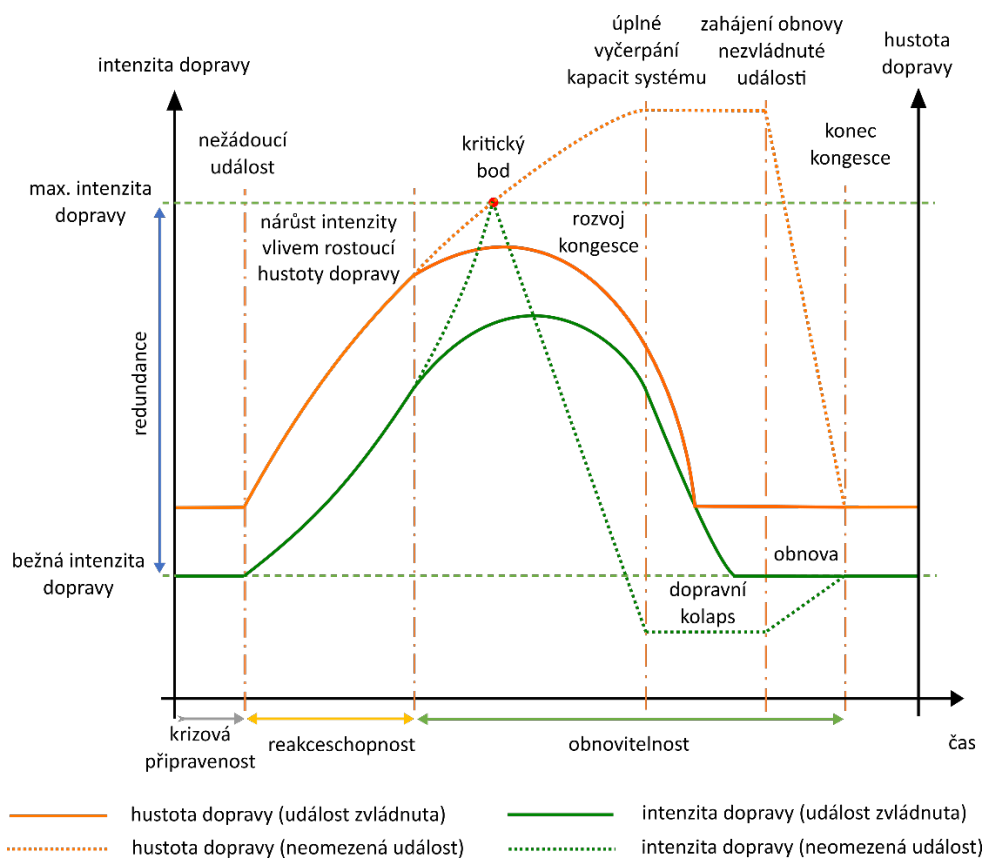
V kontextu řešené problematiky je pozornost v následujícím textu věnována již pouze dopravní propustnosti. Propustnost dopravních staveb je navržena tak, aby fungovala za definovaných podmínek. Nicméně na celou dopravní infrastrukturu působí různé hrozby. Tyto hrozby mohou být obecně klasifikovány na naturogenní a antropogenní. Naturogenní katastrofy jsou rozděleny do čtyř základních kategorií, kterými jsou extrémní meteorologické události (např. povodně, cyklóny, tornáda), geofyzikální (např. tektonická činnost, zemětřesení, tsunami), geomagnetické bouře nebo výška hladiny moře (Rodrigue, 2020). Druhá kategorie hrozeb vyplývá z lidské činnosti, která může být úmyslná či neúmyslná. Do této kategorie spadají zejména dopravní nehody, selhání infrastruktury (např. nedostatečná či špatná údržba, nedostatky v návrhové dokumentaci apod.), konflikty, terorismus a pirátství (např. války, občanské nepokoje) a hospodářské a politické šoky a pandemie (Rodrigue, 2020).

Jiný pohled na klasifikaci hrozeb ovlivňujících výkon dopravy nabízí metodika All-Hazard Guide for Transport Infrastructure (Krieger et al., 2015). Ohrožení způsobená člověkem dělí na pouze úmyslné (např. náraz, sabotáž, krádež, kybernetický útok) a pouze neúmyslné aktivity (např. nadměrné rozměry vozidla či nadměrná hmotnost vozidla) či jejich kombinace (např. blokáda, požár, exploze, únik nebezpečných látek). Kategorie ohrožení zapříčiněná přírodou jsou rozdělena do pěti kategorií, a to na meteorologická nebezpečí (např. mlha, kroupy, námraza, extrémní počasí apod.), geofyzická nebezpečí (např. zemětřesení, propad, tsunami, sopečný bahnotok apod.), gravitační nebezpečí (např. lavina, sesuvy, padání hornin), hydrologická nebezpečí (např. povodně, zvýšení hladiny podzemních vod) a jiná ohrožení (např. padající stromy, lesní požár, magnetická bouře, výpadek elektrického proudu).

Dopady hrozeb na výkon dopravní infrastruktury lze hodnotit z různých úhlů pohledu (O'Brien et al., 2015; Wilson et al., 2014; Kadri et al., 2014). Tyto dopady pak mohou mít charakter technický, provozní, ekonomický, sociální nebo environmentální. Dopady technického charakteru se vyznačují zejména poškozením samotné infrastruktury, např. propadem silnic, zhroucením tunelu či mostu. Provozní dopady poté negativně ovlivňují provoz v daném systému, např. nárůst dopravní hustoty. Ekonomickými dopady se označují ekonomické ztráty v důsledku narušení výkonu dané dopravní infrastruktury. Sociální dopady označují vliv na obyvatelstvo

(např. zdržení se v koloně). Environmentální dopady jsou poté dopady, které negativně ovlivňují životní prostředí (např. znečištění ovzduší výfukovými plyny). V tomto článku se autoři dále zaměřují na dopady provozního charakteru.

Mezi nejvýznamnější dopady provozního charakteru patří nárůst hustoty dopravního proudu. V důsledku působení nežádoucí události totiž dochází k tvorbě dopravních kongescí, a tedy ke snižování výkonu daných komunikací. Grafické znázornění dopadů vysoké hustoty dopravního proudu na intenzitu dopravy v rámci daného silničního úseku je prezentováno na obrázku 1.



Obr. 1: Vztah mezi hustotou dopravního proudu a intenzitou dopravy na úseku pozemní komunikace (Rehak et al., 2018b)

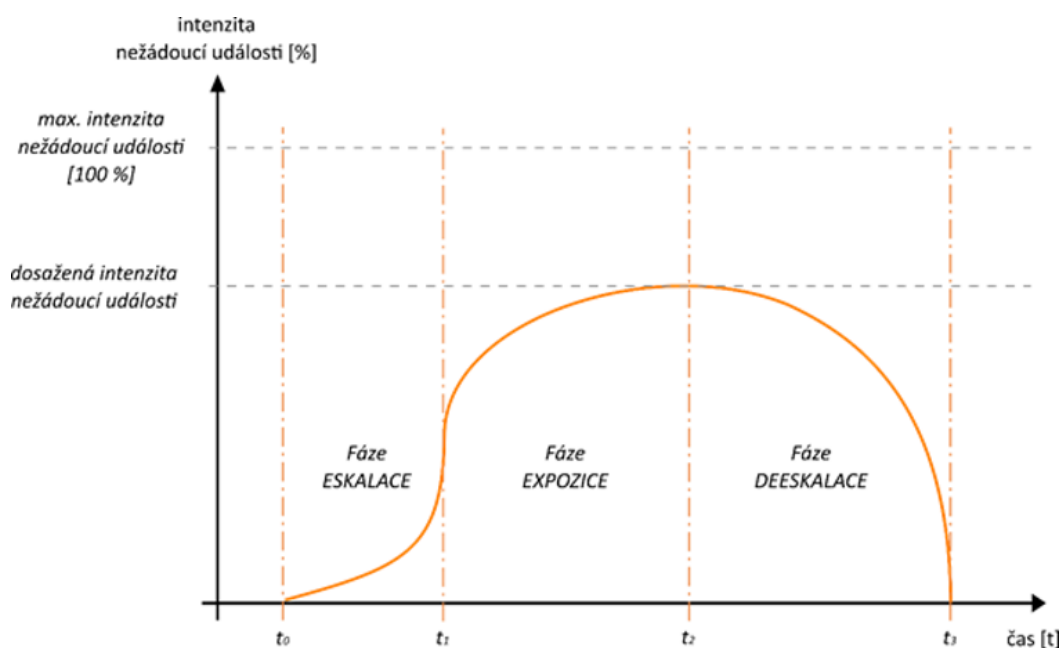
V počátečním stavu má dopravní proud konstantní rychlost, vozidla udržují velké rozestupy, hustota i intenzita jsou na nízké úrovni. Rostoucí hustota, zapříčiněná působením negativní události, způsobí zmenšení rozestupů. V případě že hustota provozu i intenzita stále narůstá a systém není schopen tyto změny vstřebat, dostávají se obě hodnoty až do kritického bodu (viz kritický bod na obrázku 1).

Zde je dosažen limit dostupného výkonu, a tedy robustnosti daného prvku. Hustota dopravy je na takovém stupni, že zapříčiní snížení rychlosti vozidel na komunikaci, přičemž zároveň dochází k významnému poklesu intenzity dopravy. Intenzita dopravy rapidně klesá, přestože hustota je stále na vzestupu. Tato situace následně vyústí ve vyčerpání kapacity systému a vznik dopravní kongesce, která je charakteristická maximální hustotou, minimální rychlostí, a tedy velmi nízkou intenzitou. Hustota a intenzita zůstávají v této linii neměnné, až do okamžiku, kdy hustota znatelně klesne pod kritický bod, který původně vedl ke zhroucení systému.

Ve fázi obnovy se hustota provozu stále snižuje, přičemž intenzita dopravy postupně roste. Tím dochází k obnově výkonu prvku kritické infrastruktury a návratu do původního stavu. Pokud nedojde k nárůstu intenzity a hustoty dopravy daného systému až do jeho maximální udržitelné hodnoty, systém sám absorbuje nárůst obou veličin a událost se následně pozvolna vrací do normálního stavu (Rehak et al., 2018a).

#### 4 Faktory ovlivňující výkon kritických prvků pozemní dopravní infrastruktury

Výkon kritických prvků pozemní dopravní infrastruktury je ovlivňován negativními a pozitivními faktory. Negativními faktory, jež determinují nežádoucí události, jsou eskalace, expozice, deescalace a intenzita těchto událostí (Onderkova et al., 2019).



Obr. 2: Průběh nežádoucí události (Onderkova et al., 2019)

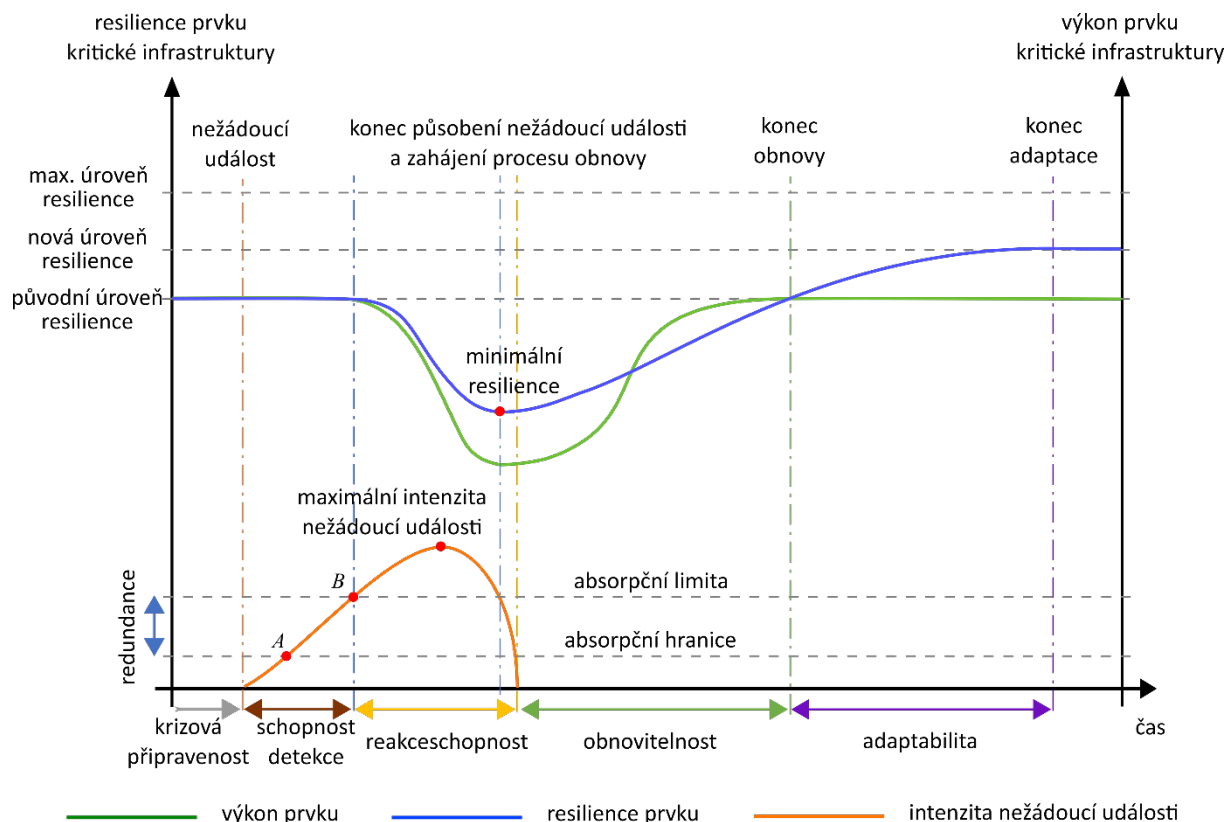
Naopak působení těchto negativních faktorů může být minimalizováno pozitivními faktory. Těmito faktory jsou zejména tři definující komponenty resilience dopravních staveb – robustnost, obnovitelnost a adaptabilita (Rehak et al., 2020; Øien et al., 2017), přičemž každá z uvedených komponent je složena ze specifických proměnných.

Nejvýznamnějším pozitivním faktorem v době působení nežádoucí události, je robustnost prvku/infrastruktury. Jde tedy o schopnost prvku kritické infrastruktury pohlcovat narušující událost (Ferrario et al., 2017). Dopady mohou být absorbovány vlastností budov, zvolenými technologiemi nebo bezpečnostními opatřeními. Robustnost je tvořena následujícími proměnnými: krizová připravenost, redundance, schopnost detekce, reakceschopnost a fyzická odolnost (Rehak et al., 2018b).

V době, kdy nežádoucí událost již pominula, nastává fáze obnovy, tedy druhá fáze resilience – obnovitelnost. Ta je charakterizována jako schopnost prvku obnovit svou činnost do původní (požadované) úrovně poskytovaných služeb. Obnovitelnost je vymezena materiálními, finančními a lidskými zdroji a procesy obnovy (Rehak et al., 2018b).

Poslední fází resilience kritické infrastruktury je adaptace. Jedná se o proces přetvoření, přestavby či přizpůsobení infrastruktury/prvku na již proběhlou nežádoucí událost. Adaptace je tedy proces změny v systému, který umožňuje lépe zvládnout dopady na infrastrukturu nebo snížit zranitelnost při případném opakování dané nežádoucí události (Johnson et al., 2018). Tento proces změny systému je určen vnitřními postupy organizace směřujícími k posilování resilience, tj. management rizik, inovační procesy a vzdělávací a rozvojové procesy (Rehak et al., 2018b).

Působení faktorů ovlivňujících výkon kritických prvků pozemní dopravní infrastruktury vychází ze vztahu mezi výkonem a resiliencí prvků kritické infrastruktury a nežádoucí událostí (viz obrázek 2). Tyto faktory mohou přispět k včasné detekci a úspěšnému zvládnutí nežádoucí události., např. intenzita dopravy může být na daném úseku silnice ovlivňována mírou reakceschopnosti (tj. jeden z faktorů determinujících robustnost) tohoto silničního úseku na určitou nežádoucí událost.



Obr. 3: Průběh působení nežádoucí události ovlivňující výkon kritického prvku dopravní infrastruktury (Rehak et al., 2018b)

## 5 Závěr

Kritické prvky pozemní dopravní infrastruktury jsou neustále vystavovány působení naturogenních či antropogenních hrozeb. V důsledku jejich působení dochází ke vzniku nežádoucích událostí, jež negativně působí na výkon dopravní infrastruktury. Dopady těchto událostí mohou být klasifikovány dle svého charakteru na technické, provozní, ekonomické, sociální a environmentální. Míra těchto dopadů je determinována tzv. negativními faktory, kterými jsou eskalace, expozice, deeskalace a intenzita nežádoucích událostí.

Účinky působení těchto negativních faktorů (tj. dopady nežádoucích událostí) mohou být tlumeny prostřednictvím tzv. pozitivních faktorů, které determinují resilienci kritických prvků pozemní dopravní infrastruktury. Těmito faktory jsou robustnost, obnovitelnost a adaptabilita těchto prvků. V kontextu přímého tlumení dopadů nežádoucích událostí je u těchto prvků stěžejní jejich robustnost, která je determinována krizovou připraveností, redundantní kapacitou, schopností detekce, reakceschopností a fyzickou odolností.

Závěrem lze tedy konstatovat, že výkon kritických prvků pozemní dopravní infrastruktury je ovlivňován nejen působením negativních faktorů, ale také faktorů pozitivních, které utvářejí resilienci těchto prvků.

### Dedikace

Tento článek byl zpracován za podpory projektu SP2020/40 „Výzkum přístupů a metod posilování resilience prvků kritické infrastruktury v pododvětví elektroenergetiky“ studentské grantové soutěže VŠB-TU Ostrava.

### Literatura

- [1] Banister, D., Stead, D. 2002. Reducing Transport Intensity. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 2(4): pp. 161-178.
- [2] Boysen, H.E. 2012. General Model of Railway Transportation Capacity. *WIT Transactions on the Built Environment*, 127: pp. 335-347. DOI: 10.2495/CR120281
- [3] Bulicek, J. 2011. Capacity of Railway Transport. University of Pardubice, Faculty of Transport Engineering, Pardubice. (in Czech)

- [4] Cools, M., Moons, E., Wets, G. 2010. Assessing the Impact of Weather on Traffic Intensity. *Weather, Climate, and Society*, 2: pp. 60-68. DOI: 10.1175/2009WCAS1014.1
- [5] Davies, A.J., Sadashiva, V., Aghababaei, M., Barnhill, D., Costello, S.B., Fanslow, B., Headifen, D., Hughes, M., Kotze, R., Mackie, J., Ranjitkar, P., Thompson, J., Troitino, D., R., Wilson, T., Woods, S., Wotherspoon, L.M. 2017. Transport Infrastructure Performance and Management in the South Island of New Zealand, During the First 100 Days Following the 2016 Mw 7.8 “Kaikōura” earthquake. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 50(2): pp. 271-299.
- [6] Dvorak, Z., Sventekova, E., Rehak, D., Cekerevac, Z. 2017. Assessment of Critical Infrastructure Elements in Transport. *Procedia Engineering*, 187: pp. 548-555. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.413
- [7] European Commission. 2006. Commission Regulation (EC) No 851/2006 of 9 June 2006 specifying the items to be included under the various headings in the forms of accounts shown in Annex I to Council Regulation (EEC) No 1108/70.
- [8] European Council. 2008. Council Directive 2008/114/EC of 8 December 2008 on the identification and designation of European critical infrastructures and the assessment of the need to improve their protection.
- [9] Fekete, A. 2011. Common Criteria for the Assessment of Critical Infrastructures. *International Journal of Disaster Risk Science*, 2(1): pp. 15-24. DOI: 10.1007/s13753-011-0002-y
- [10] Ferrario, E., Pedroni, N., Zio, E. 2017. Evaluation of the robustness of critical infrastructures by Hierarchical Graph representation, clustering and Monte Carlo simulation. *Reliability Engineering & System Safety*, 155: pp. 78-96. DOI: 10.1016/j.res.2016.06.007
- [11] Francis, R., Bekera, B. 2014. A Metric and Frameworks for Resilience Analysis of Engineered and Infrastructure Systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 121: pp. 90-103. DOI: 10.1016/j.res.2013.07.004
- [12] Hartmann, A., Ling, F.Y.Y. 2016. Value Creation of Road Infrastructure Networks: A Structural Equation Approach. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 3(1): pp. 28-36. DOI: 10.1016/j.jtte.2015.09.003
- [13] Haseeb, J. 2017. *Highway Capacity: Definition, Types & Factors* [online]. <https://www.aboutcivil.org/highway-capacity-definition-types-factors.html> (accessed 15 September 2020).
- [14] Jenelius, E. 2007. Approaches to Road Network Vulnerability Analysis: Licentiate Thesis. Royal Institute of Technology (KTH), Department of Transport and Economics, Stockholm.
- [15] Johnson, J.L., Zanotti, L., Ma, Z., Yu, D.J., Johnson, D.R., Kirkham, A., Carothers, C. 2018. Interplays of Sustainability, Resilience, Adaptation and Transformation. In: *Handbook of Sustainability and Social Science Research*: pp. 3-25. Cham: Springer. ISBN 978-3-319-67121-5. DOI: 10.1007/978-3-319-67122-2\_1
- [16] Kadri, F., Birregah, B., Chatelet, E. 2014. The Impact of Natural Disasters on Critical Infrastructures: A Domino Effect-based Study. *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 11(2): pp. 217-241. DOI: 10.1515/jhsem-2012-0077
- [17] Karamlou, A., Bocchini, P. 2014. Optimal Bridge Restoration Sequence for Resilient Transportation Networks. In: *Proceedings of the 2014 Structures Congress*: pp. 1437-1447. DOI: 10.1061/9780784413357.127
- [18] Krieger, J., Kohl, B., Mateus de Brito, J., Spousta, J. 2015. *All-Hazard Guide for Transport Infrastructure*. Bergisch Gladbach: Federal Highway Research Institute. 29 p.
- [19] Ledvinova, M. 2008. Roads Transport Significance and their Capacity. *Perner's Contacts*, 3(4): pp. 68-73. ISSN 1801-674X. (in Czech)
- [20] Leviakangas, P., Aapaoja, A. 2015. Resilience of Transport Infrastructure Systems. *Journal of Sustainable Infrastructure Development*, 1(1): pp. 80-90. DOI: 10.32783/csid-jid.v1i1.11
- [21] O'Brien, E.J., Hajjalizadeh, D., Power, R.T. 2015. Quantifying the Impact of Critical Infrastructure Failure due to Extreme Weather Events. In: *12th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP12) 2015, Vancouver, Canada*. DOI: 10.14288/1.0076110
- [22] Øien, K., Jovanovic, A.S., Grøtan, T.O., Choudhary, A., Øren, A., Tetlak, K., Bodsberg, L., Jelic, M. 2017. *Assessing Resilience of SCIs based on Indicators*. Stuttgart: European Virtual Institute for Integrated Risk Management.
- [23] Onderkova, V., Rehak, D., Slivkova, S., Brabcova, V., Patrman, D., Splichalova, A. 2019. Dynamic Modelling of Resilience of Critical Infrastructure Elements (Final report of grant project SP2018/116). VSB – Technical University of Ostrava, Ostrava. (in Czech)

- [24] Ramanathan, R. 2004. *Indian Transport towards the New Milenium: Performance, Analysis and Policy*. New Delhi: Concept Publishing Company. 212 p. ISBN 9788180690785.
- [25] Rehak D., Hromada M., Senovsky P., Krocova S., Apeltauer T., Pidhaniuk L. 2016. A Summary of Methods for Infrastructure Quality and Resilience Assessment. Prague: Government of the Czech Republic. (in Czech)
- [26] Rehak, D., Senovsky, P., Slivkova, S. 2018a. Resilience of Critical Infrastructure Elements and its Main Factors. *Systems*, 6(2). DOI: 10.3390/systems6020021.
- [27] Rehak, D., Senovsky, P., Hromada, M., Pidhaniuk, L., Dvorak, Z., Lovecek, T., Ristvej, J., Leitner, B., Sventekova, E., Maris, L. 2018b. *Methodology of the Critical Infrastructure Elements Resilience Assessment*. Ostrava: VSB – Technical University of Ostrava. (in Czech)
- [28] Rehak, D., Hromada, M. Lovecek, T. 2020. Personnel threats in the electric power critical infrastructure sector and their effect on dependent sectors: Overview in the Czech Republic. *Safety Science*, 127. DOI: 10.1016/j.ssci.2020.104698
- [29] Robinson, C.P., Woodard, J.B., Varnado, S.G. 1998. Critical Infrastructure: Interlinked and Vulnerable. *Issues in Science and Technology*, 15(1): pp. 61-67.
- [30] Rodrigue, J.P. 2020. *The Geography of Transport Systems*, 5th edit. Routledge, New York. 456 p. ISBN 978-0-367-36463-2.
- [31] Scott, D.M., Novak, D.C., Aultman-Hall, L., Guo, F. 2006. Network Robustness Index: A new method for identifying critical links and evaluating the performance of transportation networks. *Journal of Transport Geography*, 14(3): pp. 215-227. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2005.10.003
- [32] Slivkova S., Rehak, D., Novotny, P. 2018. Critical Element Designation System in Rail Transport in the Czech Republic. *Chemical engineering transactions*, 67: pp. 775-780. DOI: 10.3303/CET1867130
- [33] Transport for London. 2013. *Technical Note 10: What is the Capacity of the Road Network for Private Motorised Traffic?* [online]. <http://content.tfl.gov.uk/technical-note-10-what-is-the-capacity-of-the-road-network-for-private-motorised-traffic.pdf> (accessed 20 September 2020).
- [34] Valenzuela, Y.B., Rosas, R.S., Mazari, M., Risse, M., Rodriguez-Nikl, T. 2017. Resilience of Road Infrastructure in Response to Extreme Weather Events. In: *International Conference on Sustainable Infrastructure 2017, New York*. DOI: 10.1061/9780784481219.031
- [35] Wilson, G., Wilson, T.M., Deligne, N.I., Cole, J.W. 2014. Volcanic Hazard Impacts to Critical Infrastructure: A Review. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 286: pp. 148-182. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2014.08.030
- [36] Zagorecki, A., Ristvej, J., Klupa, K. 2015. Analytics for Protecting Critical Infrastructure. *Communications – Scientific Letters of the University of Žilina*, 17(1): pp. 111-115. ISSN 1335-4205.
- [37] Zhang, Z., Li, X., Li, H. 2015. A Quantitative Approach for Assessing the Critical Nodal and Linear Elements of a Railway Infrastructure. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 8: pp. 3-15. DOI: 10.1016/j.ijcip.2014.11.001