

Leopold HUDEČEK¹

MULTIPARAMETRICKÝ NÁVRH KONSTRUKCÍ A SPOLEHLIVOST DOPRAVNÍHO SYSTÉMU

MULTI-PARAMETRIC PROPOSAL OF CONSTRUCTION AND RELIABILITY OF TRANSPORT SYSTEM

Abstract

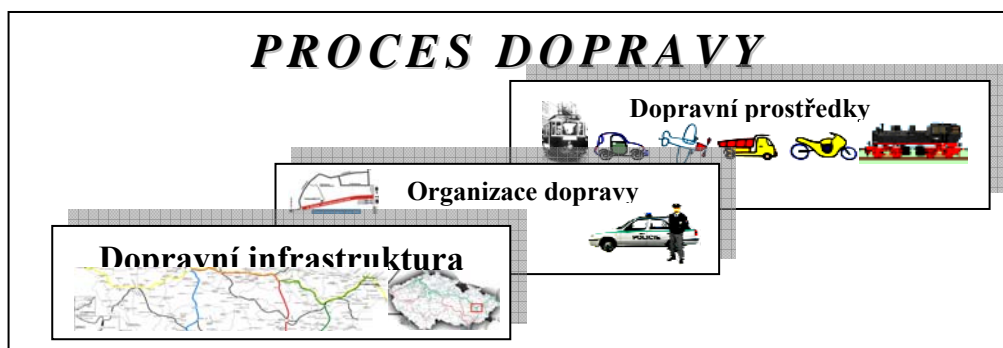
The goal of the work was to find means for determination of reliability of transport system exposed to effects of influence of specific conditions. The definition of reliability as a general feature of the object is crucial, lying in its ability to fulfil required functions in maintaining values of operational indicators in certain limits and in time according to technical conditions. For elements of transport infrastructures it is design lifespan of certain object stand for the time. For examination of reliability of transport system reliability of elements of transport infrastructure is limiting where the design lifespan is set while paying attention to their role in the system. The results of this work have its place in the field of new approach to designing of progressive structures, which is an integrated proposal representing multi-parametric proposal of a structure embracing the whole spectrum of reliability criteria from the aspect of various resolving levels (material, component, object, finance) in the process of all phases of life cycle.

1 ANALÝZA PROCESŮ V DOPRAVNÍM SYSTÉMU

Dopravní systém lze definovat jako souhrn vzájemně souvisejících prvků, sdružený do logického celku, umožňující objektům přemísťování. Dopravní systém se obecně skládá z komponent (nebo elementů), které jsou spojeny za účelem umožnění proudění těchto objektů (materiálu, informací, nebo energie) v prostoru a čase.

Dopravu je možno obecně definovat jako přemísťování objektů v prostoru a čase. Objektem mohou být předměty, osoby, informace, energie apod. Doprava je podstatou ekonomických a sociálních aktivit, měla by však těmto aktivitám sloužit a ne být jejich výsledkem.

Proces dopravy je realizován prostřednictvím technologie použité k dopravě, která se skládá z prvků které jsou prezentovány na Obr. 1.



Obr. 1: Prvky v procesu dopravy

¹ Ing. Leopold Hudeček, Ph.D., Katedra dopravního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Poděště 1875, Ostrava-Poruba, tel.: +420 597 321 310, e-mail: leopold.hudecek@vsb.cz.

Dopravní prostředek je možno obecně popsat jako pohyblivý hmotný objekt (těleso) nebo jiný technický resp. technologický soubor, sloužící k dopravě materiálu a přepravě osob. Jedná se o mobilní součást dopravního systému. Dopravní prostředky jako prvek systému v procesu dopravy má nesporně vliv na fungování systému. Jeho zkoumání je však mimo rámec oboru stavebních konstrukcí, proto nebude předmětem další analýzy.

Organizace dopravy lze definovat jako „plánovitě zpracovaná opatření nevyžadující stavební úpravy“. Organizace dopravy je velice rozsáhlou disciplínou, cesta k řešení dílčích prvků vede napříč mnoha vědními obory. Jedním z klíčových oborů je operační výzkum, zvláště oblast zkoumání dějů a jejich matematického popisu. Organizace dopravy využívá mimo jiné i dílčích poznatků z vědního oboru logistiky, která se zabývá fyzickými toky zboží či jiných druhů zásob od dodavatele k odběrateli a informačními toky v písemné nebo i ústní podobě.

Pro vlastní řízení cílevědomé zásahy do vývoje dopravní situace za účelem dosažení požadovaných cílů je možné využít řady regulačních prvků jako jsou například jízdní řády, světelná signalizační zařízení, prvky dopravního značení, ruční řízení dopravním policistou ...

Dopravně organizační opatření pak ovlivňují propustnosti komunikační sítě, parkování a odstavování vozidel (v případě silniční sítě), kvalitu životního prostředí. Mezi nástroje pro organizaci dopravy ve smyslu cílevědomých zásahů do vývoje dopravní situace je možné zařadit také prvky telematiky.

Působení vlivu vnějších extrémních podmínek na organizaci dopravy je nesporný, ale právě změnami v organizaci dopravy můžeme pozitivně ovlivnit spolehlivost dopravního systému.

Dopravní infrastruktura

Obecně je dopravní infrastruktura prvkem ze skupiny národohospodářských odvětví, které zajišťují předpoklady pro celkový rozvoj ekonomiky. Je rovněž jedním z prvků dopravního systému. Aby dopravní infrastruktura pomáhala účinně ekonomickému a sociálnímu rozvoji, musí kromě toho, že je budována v předstihu, být také spolehlivou, to znamená plnit požadované funkce při zachování hodnot provozních ukazatelů v daných mezích a v čase podle stanovených technických podmínek.

Tab. 1: Porovnání rozsahu dopravní infrastruktury na území ČR

Infrastruktura	Období ^{*)} :					
	2000	2002	2003	2004	2005	2006
Místní komunikace (km)	72 300	72 300	72 927	72 927	72 927	72 927
Délka silnic a dálnic celkem (km)	55 410	55 422	55 447	55 500	55 510	55 585
Provozní délka tratí celkem (km)	9 444	9 600	9 602	9 612	9 614	9 597
MHD – Celk. délka provozované sítě (km)	774	823	826	840	845	844
Celk. délka splavných vodních cest (km)	664	664	664	664	664	664
Délka ropovodů celkem (km)	675	675	675	675	675	675
Počet letišť celkem (ks)	86	85	87	87	87	90
Počet překladišť kombinované dopravy celkem (ks)	14	11	13	12	11	12

**) Pozn.: údaje za rok 2007 jsou ve fázi zpracovávání ČSÚ*

Nejčteněji zastoupené stavební prvky dopravní infrastruktury:

Pozemní komunikace je dopravní cesta určená k užití silničními a jinými vozidly a chodci, včetně pevných zařízení nutných pro zajištění tohoto užití a jeho bezpečnosti.

Železniční tratě je soubor stavebně technických zařízení dopravní cesty určené k pohybu drážního vozidla (pro železniční dráhy, dráhu tramvajovou, pozemní lanovou dráhu a metra).

Tab. 2: Rozsah dopravní infrastruktury v ČR podle druhu dopravy – souhrnný přehled

Infrastruktura	km	%
Komunikace pro nekolejovou pozemní dopravu	129 356	92,2
Kolejová doprava	9 597	6,8
Ostatní	1 339	1,0

Lze konstatovat, že spolehlivost dopravního systému z pohledu vlivu působení vnějších extrémních podmínek ovlivňuje nejvíce spolehlivost stavebních prvků dopravní infrastruktury (dopravních staveb) a to pozemních komunikací a železničních tratí včetně příslušných objektů, které jsou součástí dopravní cesty, což představuje podíl 99% z celkového rozsahu dopravní infrastruktury na území ČR (viz tab. 2.). Spolehlivost zahrnuje bezpečnost, použitelnost a trvanlivost konstrukce.

2 SPOLEHLIVOST A DOPRAVNÍ INFRASTRUKTURA

Spolehlivostí ve zcela obecném pojetí rozumíme schopnost objektu či systému chovat se žádoucím způsobem. Naopak nespolehlivostí rozumíme výskyt nežádoucích jevů.

Spolehlivost je tedy obecná vlastnost objektu spočívající v jeho schopnosti plnit požadované funkce při zachování hodnot provozních ukazatelů v daných mezích a v čase podle stanovených technických podmínek – pro prvky dopravní infrastruktury je za tento čas považuje návrhová životnost příslušného objektu. Spolehlivost zahrnuje bezpečnost, použitelnost a trvanlivost konstrukce. Návrhovou životnost pro jednotlivé prvky obecně stanovuje [3] ČSN P ENV 1991-1 Část 1: Zásady navrhování.

Například návrhová životnost trvalých mostů, jak vyplývá z [3] je 100 let. Návrhová životnost je tedy předpokládaná doba, po kterou mostní objekt bude používán pro určený účel a nezmění se. Konstrukčních částí, jejichž životnost je kratší než návrhová životnost mostu (zde patří i vozovka, železniční svršek, apod.), je nutné v průběhu životnosti opravovat, resp. vyměnit.

U dopravního systému prakticky nelze stanovit dobu životnosti, naopak se předpokládá jeho nepřetržitá funkčnost. Spolehlivost dopravního systému je však prokazatelně limitována spolehlivostí prvků dopravní infrastruktury, u kterých je stanovována projektovaná doba životnosti se zohledněním jejich významu v systému.

Za vlastnosti spolehlivosti můžeme obecně považovat:

- bezporuchovost
- životnost
- udržitelnost (nemá smysl pro čistě přírodní objekty)
- opravitelnost (nemá smysl pro čistě přírodní objekty)
- skladovatelnost (má smysl pouze pro část technických objektů)
- pohotovost (má smysl pouze pro část technických objektů)
- bezpečnost

Základní ukazatele bezporuchovosti jsou následující:

- t_1doba 1 poruchy (význam pro antropogenní objekty)
- t_f doba mezi poruchami
- t_z život objektu, součet doby provozu do mezního stavu ukončení funkce (vyjma pro antropogenní objekty, u technických objektů může následovat generální oprava)
- t_{oo}doba opravy (význam pro antropogenní objekty)
- t_{ou}doba preventivní údržby (význam pro antropogenní objekty)

Kvantifikace spolehlivosti

Kvantifikace spolehlivostních, respektive krizových jevů je potřebná ve všech fázích řešení krizí. Pozornost budeme věnovat především kvantifikaci jevů budoucích, což je oblast nejnáročnější.

Při kvantifikaci existujících krizí (vyhodnocení) pracujeme s ukazateli deterministickými. Naopak u jevů budoucích se jedná o jevy stochastické, tedy nahodilé.

Ukazatele spolehlivosti

Systém má obecně spolehlivost U_S , vyjádřenou ukazateli systému U_i , a ukazateli prvků u_i .

$$U_S = \prod_{i=1}^n U_i \quad (1)$$

Kde: **n** - počet prvků **i**

Pravděpodobnost

První definici pravděpodobnosti se snažili lidé zformulovat, když se snažili najít systém, který by jim umožnil vyhrát nad hazardními hrami (v polovině 17. století – rozvoj teorie hazardních her, zejména zásluhou B. Pascala a P. Fermata). Silným stimulem rozvoje této teorie byl též prudký rozmach pojišťovnictví. Od té doby pronikl pojem náhodnosti a teorie jeho kvantitativního popisu téměř do všech oblastí poznání.

Z podstaty vzniku náhodných jevů vyplývá, že při opakované realizaci pokusu se stejný jev (např. vznik poruchy) za nezměněných podmínek vyskytuje s různou četností, tj. s různou pravděpodobností.

Pravděpodobnost výskytu jevu $P(A)$ je definována:

$$P(A) = \frac{n}{m} \quad (2)$$

Kde: **n** - je počet pokusů, kdy jev nastal,

m - celkový počet provedených pokusů.

Pravděpodobnost má tyto vlastnosti:

- je nezáporná a nabývá hodnoty z intervalu $\langle 0, 1 \rangle$
- pro jev jistý je $P(A) = 1$, protože $n = m$
- pro nemožný jev je $P(A) = 0$, protože $n = 0$

Zde bych se pozastavil. U prvků dopravní infrastruktury nelze u drtivé většiny případů provádět touto metodikou určování pravděpodobnosti. Proto hledáme použitelnou metodu pro využití u dopravních staveb. Proto budeme dále zjednodušeně pro ukazatel spolehlivosti považovat za pravděpodobnost, že určitý jev, např. porucha, nastane.

Například pravděpodobnost výskytu povodňových průtoků je zahrnuta v Q_N viz [4], kde Q_N je definován jako maximální okamžitý průtok, který je dosažen nebo překročen průměrně jedenkrát za N let.

Optimální spolehlivost vyplyne z kompromisu mezi požadovanou spolehlivostí (přípustné riziko poškození) a technicko-ekonomickými možnostmi. Do technicko-ekonomických nákladů je mimo stavební investiční náklady nutné zohlednit i zvýšení nákladů na dopravu pro případ, kdy například nastane neprůjezdnost komunikace pro poruchu mostu způsobenou záplavovou vodou.

Diferenciace spolehlivosti mostních objektů přes vodní toky je nutné provádět s přihlédnutím k významu komunikace na mostním objektu [2] (ČSN 73 6101). Význam komunikace v souvislosti s možnou dočasnou nepřechodností vozidel pozemních komunikací přes most závisí na:

- hustotě dopravy (počty vozidel)
- délce a době trvání objížděky (zvýšené dopravní náklady),
- nepřístupnosti určité lokality, apod.

Důsledky výskytu nežádoucího jevu je možné vyjádřit finanční částkou odpovídající vzniklým škodám (náklady spojené s odstraněním poruchy konstrukce, případně další vyčíslení souvisejících škod). Takto definované riziko se pak dostává do ekonomické kategorie a otevírá možnost využití dalších analytických metod. Důsledky mohou představovat například zvýšení přímých nákladů na dopravu, ale i náklady v důsledku zvýšeného zatížení objížděné komunikace (zvýšené opotřebení vlastní konstrukce dopravním zatížením a z toho plynoucí zkrácení životnosti, zhoršení podmínek v jejím okolí, narušení životního prostředí a další).

Novým koncepčním přístupem v oblasti navrhování progresivních konstrukcí je integrovaný návrh, reprezentující multiparametrický návrh konstrukce zahrnující celé spektrum kritérií udržitelnosti, a to z pohledu různých rozlišovacích úrovní (materiál, komponenta, objekt) v průběhu všech fází životního cyklu. Nové prvky tohoto přístupu významným způsobem mohou měnit názor na dlouhodobou efektivitu vynaložené investice a to uvažování celého životního cyklu objektu. Právě hodnocení chování daného objektu dopravní infrastruktury v rámci celého životního cyklu, a ne pouze stavu v okamžiku předání objektu do provozu (resp. v krátkém časovém období limitovaném záručními podmínkami), je prvkem, který může zásadním způsobem ovlivňovat rozhodování cílových investorů a uživatelů. Podmínkou pro dosažení takových parametrů konstrukce, které budou efektivní i z hlediska dlouhodobě předpokládaných nákladů a požadavků na provoz, údržbu, opravy, rekonstrukce, modernizace až po demolici a recyklaci materiálů je integrace různých složek návrhu – technického (materiálového a konstrukčního), environmentálního a ekonomického – do jednoho návrhového procesu. Investice by tedy neměla být posuzována jen dle nákladů na její pořízení, to má totiž zpravidla značné důsledky ekonomické, případně i ekologické.

Celkové náklady celého životního cyklu objektu sestávají z celé řady položek. Obecně můžeme jejich výpočet stanovit následujícím vztahem:

$$N_{\text{celk}} = N_{\text{INV}} + N_u + N_p + (p_i \cdot N_i) \quad (3)$$

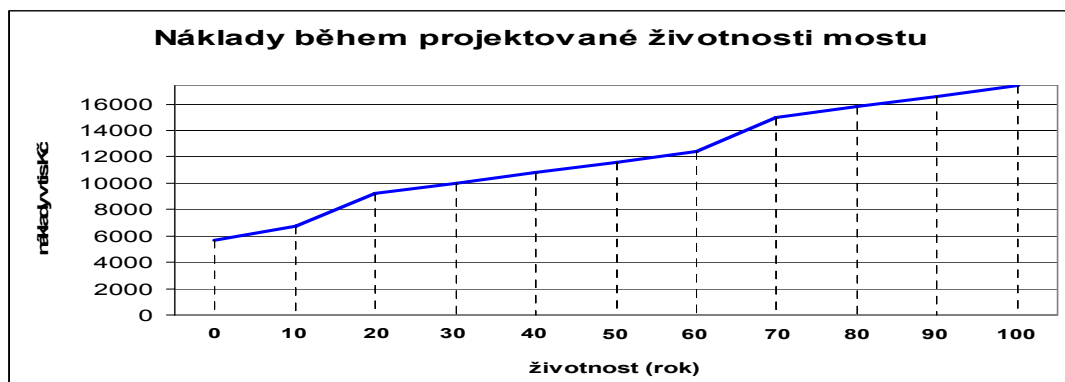
Kde: $i = 1, 2, \dots, n$

N_{INV} náklady spojené s projektovými pracemi a vlastní stavbou (někdy označované jako investiční či pořizovací náklady)

N_u náklady na údržbu (vč. nákladů na kontrolu a prohlídky po celou dobu předpokládané životnosti t_D roků);

N_p náklady na provoz objektu (osvětlování, pojištění během doby t_D apod.)

$p_i \cdot N_i$ obecně skupina nákladů na opravy či rekonstrukce, které mohou nastat s pravděpodobností p_i během doby návrhové životnosti t_D , (tj. včetně nákladů na případné přerušení provozu a podobně), náklady na odstranění stavby apod. .



Obr. 2: Graf – Příklad průběhu nákladů během projektované životnosti mostu

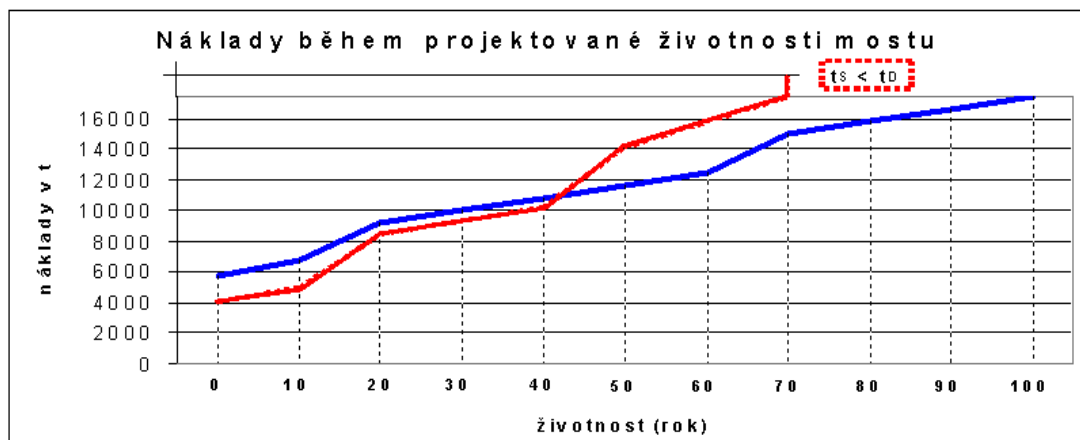
Hodnoty pravděpodobností p_i uvedené v (3) se obvykle v případech nosných stavebních konstrukcí odvíjejí od pravděpodobností dosažení mezních stavů (mezní stavy únosnosti a použitelnosti – viz [5] EN 1990), jejich definic a požadované (návrhové, cílové) životnosti t_D objektu, konstrukce či prvku. Je proto nutno využívat stochastickou analýzu, simulační techniky apod.

Je třeba také uvážit, že v případech, kdy nebude dodržen požadavek na návrhovou životnost (např. díky snížení nákladů N_{INV}), tj. když pro skutečně dosaženou životnost t_S bude platit:

$$t_S < t_D \quad (4)$$

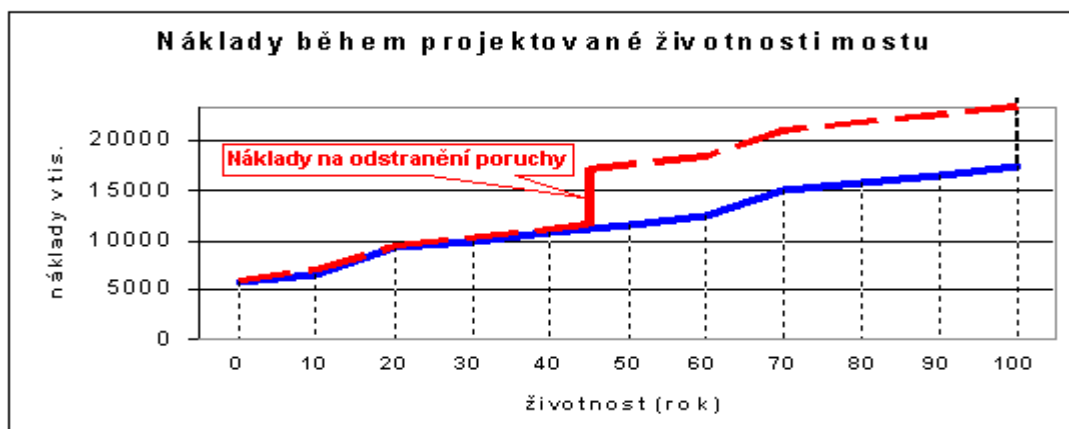
kde : t_S je skutečně dosažená doba životnosti
 t_D doba návrhové životnosti

pak se N_{celk} dokonce mohou zvýšit, jestliže se započítají ztráty způsobené předčasným ukončením funkce objektu (náklady na demolici, náklady s uložení odpadů apod.).



Obr. 3: Graf - Průběh nákladů během projekt. životnosti mostu, kdy $t_S < t_D$ díky snížení N_{INV}

Do nákladů na škody v případě dopravního systému, které mohou být způsobené obecně jakoukoliv poruchou, je nutné zahrnout mimo stavební náklady také náklady způsobené vynucenou objížděkou po jiné dopravní cestě. Jedná se nejen o zvýšení přímých nákladů na dopravu, ale i o náklady v důsledku zvýšeného zatížení objížděné komunikace (zvýšené opotřebení vlastní konstrukce dopravním zatížením a z toho plynoucí zkrácení životnosti, zhoršení podmínek v jejím okolí a další).



Obr. 4: Graf -Průběh nákladů během projekt. živ. mostu s opravou poruchy způsobené povodní

Cílem tohoto článku je mimo jiné rozšíření a zobecnění oblasti finančních nákladů a to o doposud nevyčíslované položky včetně vyčíslení skryté finanční újmy uživatelů dopravní infrastruktury a dalších dotčených subjektů při vynucené změně procesu v dopravním systému. Do vztahu (3) je tedy nutno doplnit prvek, který by postihl případy posuzování vlivu fenoménu záplav a povodní na prvky dopravního systému. Pak bude vztah vypadat následně:

$$N_{\text{celk}} = N_{\text{inv}} + N_u + N_p + p_{\text{op}} \cdot N_{\text{COP}} + p_i \cdot N_i \quad (5)$$

kde : p_{op} hodnota pravděpodobnosti viz vztah (3)

N_{COP} náklady na opravu poruchy způsobené záplavami, povodní

Náklady na opravu poruchy (způsobené například záplavami) pak stanovíme následujícím způsobem:

$$N_{\text{COP}} = N_R + N_T + N_P + N_D \quad (6)$$

kde : N_R celkové náklady na opravu

N_T náklady časových ztrát způsobených objížděkou

N_P náklady na prodloužení přepravních vzdáleností případně ztráty z důvodu nerealizovaných přeprav

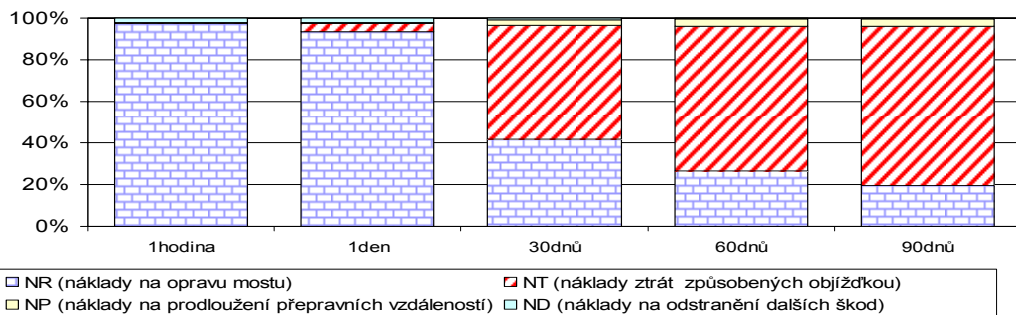
N_D náklady na odstranění dalších škod souvisejících s poškozením mostu vlivem poruchy (okolní objekty, zdraví obyvatel atd.)

Hodnoty jednotlivých položek N_{COP} stanovíme například dle metodiky zpracované podrobně v [1], případně [6]. Konkrétní hodnocení pak může mít následující výstupy :

Pro prezentaci je vybrán příklad silnice II/141 v úseku Těšovice – Žichovec. kdy se jedná o úsek silnice, ve kterém při povodních v roce 2002 došlo skutečně k poškození mostů číslo 017 a 018, včetně poruchy mostu na jedné z případných objízdých tras.

Intenzita dopravy v posuzovaném úseku činí 1704 vozidel za 24 hodin v obou směrech, objízdá trasa je delší o 6,218 km, doba jízdy se prodlouží o 0,115 hodin (t.j. o 9,3 minut).

Porovnání poměru jednotlivých nákladů



Obr. 5: Graf - Porovnání poměru jednotlivých položek nákladů na opravu v % z celkových nákladů

a) Náklady celého životního cyklu mostu bez poškození povodní (délka přemostění 11m):

$$N_{\text{celk}} = N_{\text{inv}} + N_u + N_p + p_{\text{op}} \cdot N_{\text{COP}} + p_i \cdot N_i \rightarrow N_{\text{celk}} = 5700 + 8200 + 3500 + 1 \cdot 0 = 17400 \text{ tis. Kč} \quad (7)$$

b) Náklady celého životního cyklu mostu s poškozením povodní (délka přemostění 11m):

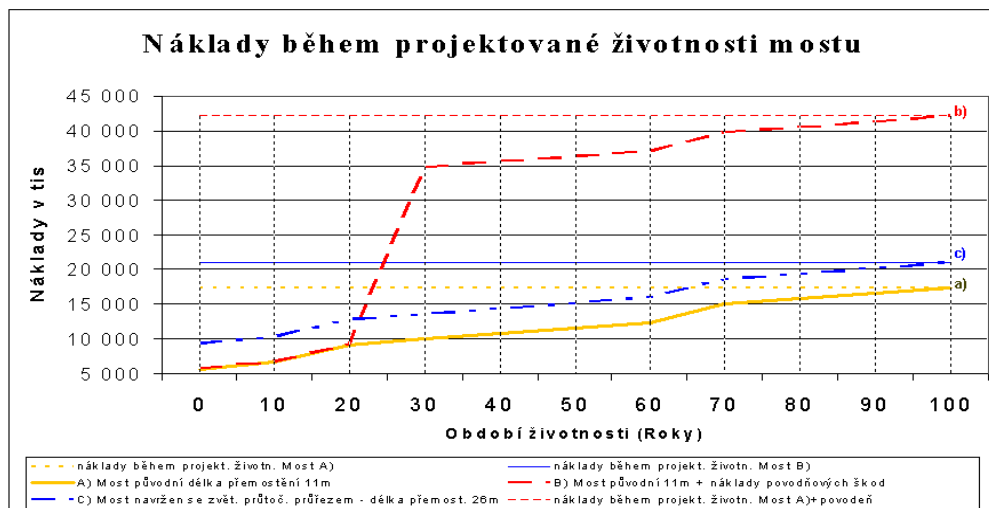
Hodnota pravděpodobnosti opravy poškození povodní během návrhové životnosti posuzovaného mostu daná Q_{100} viz [4]: $p_{\text{op}} = 1$

$$N_{\text{celk}} = N_{\text{inv}} + N_u + N_p + p_{\text{op}} \cdot N_{\text{COP}} + p_i \cdot N_i \rightarrow N_{\text{celk}} = 5700 + 8200 + 3500 + 1 \cdot 24700 = 42100 \text{ tis. Kč} \quad (8)$$

c) Náklady celého životního cyklu mostu bez poškození povodní zvětšením průtočného profilu mostu - návrh mostu s délkou přemostění 26m :

$$N_{\text{celk}} = N_{\text{inv}} + N_u + N_p + p_{\text{op}} \cdot N_{\text{COP}} + p_i \cdot N_i \rightarrow N_{\text{celk}} = 9261 + 8200 + 3500 + 0 \cdot 0 = 20961 \text{ tis. Kč} \quad (9)$$

Z příkladu konkretizovaného v bodech a) až c) vyplývá, že zvýšením počátečních investičních nákladů z důvodu zlepšení technického řešení o 3.561 tis.Kč vznikne úspora 21.139 tis.Kč. Výsledek výpočtů (7) až (9) je znázorněn v následujícím grafu na Obr. 5.



Obr. 6: Graf - Porovnání nákladů během projektované životnosti mostu

3 ZÁVĚR

Cílem příspěvku je prezentace a popis jednoho z prostředků pro zkoumání a stanovování spolehlivosti dopravního systému a zároveň rozšíření a zobecnění oblasti finančních nákladů a to o doposud nevyčíslované položky včetně vyčíslení skryté finanční újmy uživatelů dopravní infrastruktury a dalších dotčených subjektů při vynucené změně procesu v dopravním systému.

Výchozí je definice spolehlivosti jako obecné vlastnosti objektu spočívající v jeho schopnosti plnit požadované funkce při zachování hodnot provozních ukazatelů v daných mezích a v čase podle stanovených technických podmínek. Pro prvky dopravní infrastruktury je za tento čas považována návrhová životnost příslušného objektu. Pro zkoumání spolehlivosti dopravního systému je limitující spolehlivost prvků dopravní infrastruktury, u kterých je stanovována projektovaná doba životnosti se zohledněním jejich významu v systému. Následně byly stanoveny zásady, jak rozšířit a zobecnit oblast finančních nákladů a to o doposud nevyčíslované položky včetně vyčíslení skryté finanční újmy uživatelů dopravní infrastruktury a dalších dotčených subjektů při vynucené změně procesu.

Jsem názoru, že výše prezentované výsledky mají své místo v oblasti nového přístupu při navrhování progresivních konstrukcí, což představuje integrovaný návrh, reprezentující multiparametrický návrh konstrukce zahrnující celé spektrum kritérií udržitelnosti, a to z pohledu různých rozlišovacích úrovní (materiál, komponenta, objekt, finance) v průběhu všech fází životního cyklu daného objektu.

4 LITERATURA

- [1] Hudeček, L. : Vliv zvláštních podmínek na konstrukce dopravních staveb v procesu zkoumání a stanovování spolehlivosti dopravního systému - Disertační práce, VŠB TU Ostrava 2008
- [2] ČSN 73 6101 : Projektování silnic a dálnic, ČNI 2005
- [3] ČSN P ENV 1991-1 Část 1 : Zásady navrhování, ČNI 1996
- [4] ČSN 75 1400 : Hydrologické údaje povrchových vod, ČNI 1997
- [5] ČSN EN 1990 : Eurokód - Zásady navrhování konstrukcí, ČNI 2004
- [6] Broul J. , Hudeček L. : Stanovení důlních škod u poddolovaných železničních staveb – Monografie, Ostrava 2003, ISBN 80-248-0262-7

Oponentní posudek vypracoval: Doc. Dr. Ing. Jaromír Lazar

