

**Martin KREJSA<sup>1</sup>**

**PRAVDĚPODOBNOSTNÍ VÝPOČET ŠÍŘENÍ ÚNAVOVÉ TRHLINY  
S VYUŽITÍM PROGRAMU FCPROBCALC**

**PROBABILISTIC CALCULATION OF FATIGUE CRACK PROGRESSION  
USING FCPROBCALC CODE**

**Abstrakt**

Příspěvek je zaměřen na jeden z možných způsobů posouzení spolehlivosti cyklicky namáhané ocelové konstrukce s ohledem na vznik únavových trhlin z okraje a povrchu, které vede k návrhu systému prohlídek konstrukčních detailů náchylných na únavové poškození. Pro řešení pravděpodobnostní úlohy byla použita nově vyvíjená metoda Přímého Optimalizovaného Pravděpodobnostního Výpočtu (zkráceně POPV), implementovaná do programu FCProbCalc.

**Klíčová slova**

Přímý Optimalizovaný Pravděpodobnostní výpočet, POPV, funkce spolehlivosti, pravděpodobnost poruchy, šíření únavové trhliny, prohlídka konstrukce, náhodná proměnná.

**Abstract**

The paper gives examples of the probabilistic assessment of a steel cyclic loaded structure. Fatigue progression of the cracks from the edge and from the surface is used as a basis for proposing a system of inspections of details which tend to be damaged by fatigue. The newly developed method Direct Optimized Probabilistic Calculation (DOProC method) was used for solution. The method was applied in FCProbCalc code.

**Keywords**

Direct Optimized Probabilistic Calculation, DOProC, Safety Margin, Probability of Failure, Fatigue Crack Progression, Inspection of Structure, Random Variable.

## 1 ÚVOD

V současné době se pro návrh a posuzování spolehlivosti prvků a systémů nosných konstrukcí s předepsanou úrovní spolehlivosti používá množství výpočetních postupů, které vycházejí z teorie pravděpodobnosti a matematické statistiky. Jejich vývoj zažívá v poslední době značný vzestup. Metody označované jako pravděpodobnostní umožňují provádět analýzu rezervy spolehlivosti definované výpočetním modelem, u něhož mají alespoň některé vstupní veličiny náhodný charakter. Tyto výpočetní postupy výrazně přispívají ke kvalitativně vyšší úrovni posudku spolehlivosti a zajištění bezpečnosti uživatelů navrhovaného objektu.

Pravděpodobnostní způsob posuzování a navrhování konstrukcí do běžné projekční praxe teprve proniká. Předpokladem jeho uplatnění je zejména dostatečná datová základna vstupních veličin včetně praktických zkušeností, neboť celou řadu vstupních údajů nelze opírat pouze o modelování a měření v laboratoři (například v geotechnice, viz [4]). Uvedené výpočetní postupy se

---

<sup>1</sup> Doc. Ing. Martin Krejsa, Ph.D., Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 321 303, e-mail: martin.krejsa@vsb.cz .

využívají zejména při návrhu nosných systémů pozemních a inženýrských staveb, u nichž lze mj. zohlednit i degradační procesy v konstrukci [8, 13]. Lze u nich provádět tzv. Performance-Based Design vedoucí k návrhu stavebních objektů s ohledem na jejich užité vlastnosti, zejména na jejich trvanlivost, požární odolnost, izolační schopnosti a seismickou odolnost [9]. Pravděpodobnostní přístup nachází své uplatnění i v rizikovém inženýrství [14]. Vyvíjí se rovněž stochastické modely interakce stavebních objektů s podložím, příp. s nadložím tunelů [17], a rozpracovávají se postupy citlivostní analýzy vstupních náhodných veličin [7].

Článek je zaměřen na využití nově vyvíjené pravděpodobnostní metody Přímého Optimalizovaného Pravděpodobnostního Výpočtu (dále jen POPV), která již byla teoreticky podrobně popsána v řadě publikací [3, 21] a aplikovaná např. v softwaru ProbCalc [2], resp. Anchor [4]. Metoda POPV je určena pro řešení pravděpodobnostních úloh, u nichž mají některé vstupní veličiny náhodný charakter a lze je tedy vyjádřit stochasticky neparаметrickým (empirickým) případně parametrickým rozdělením. Hlavní uplatnění metody POPV spočívá zejména v oblasti pravděpodobnostního posuzování spolehlivosti nosných konstrukcí. Metodu lze využít také pro pravděpodobnostní navrhování prvků konstrukcí s předepsanou úrovní spolehlivosti. V řadě případů se jedná o velmi efektivní způsob výpočtu s přesným odhadem výsledných pravděpodobností, který je zatížen pouze numerickou chybou a chybou vyplývající z diskretizace vstupních a výsledných veličin. Nevýhodou je značný strojový čas výpočtu u úloh s větším množstvím náhodných veličin, diskretizovaných větším počtem intervalů (tříd). Řešením pak bývá použití tzv. optimalizačních technik, které umožňují výrazně snížit strojový čas výpočtu při zachování korektnosti řešení [3].

Jednou z oblastí, kde byla metoda POPV úspěšně aplikovaná, souvisí s pravděpodobnostním výpočtem šíření únavových trhlin v cyklicky namáhaných ocelových konstrukcích a mostech s využitím programu FCProbCalc [12], který umožňuje efektivně a operativně sledovat vývoj únavového poškození sledované konstrukce, stanovit časy inspekčních prohlídek a zajistit tak její provozuschopnost z hlediska únavového poškození. Zpracovaná metodika i její aplikace může výrazně zkvalitnit odhad nákladů vložených do údržby cyklicky namáhaných konstrukcí a mostů.

## 2 VYUŽITÍ METODY POPV K VÝPOČTU ŠÍŘENÍ ÚNAVOVÝCH TRHLIN

Spolehlivost nosné konstrukce, namáhané proměnným zatížením, je výrazně ovlivněna degradačními účinky, způsobenými zejména únavou základního materiálu. Jednou z alternativ, jak lze tyto vady a materiálové defekty podchytit, je lineární lomová mechanika, která je do problematiky návrhu nosných stavebních konstrukcí postupně přebírána a upravována [1]. Pro popis růstu trhliny se v případě metody lineárně pružné lomové mechaniky [6] často používá Paris-Erdoganova rovnice, která definuje vztah mezi rychlostí šíření trhliny  $\frac{da}{dN}$  a rozkmitem faktoru intenzity napětí  $\Delta K$  v čele trhliny:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m \quad (1)$$

kde  $C$  a  $m$  jsou materiálové konstanty,  $a$  je rozměr (délka) trhliny a  $N$  je počet zatěžovacích cyklů. Předpokladem pro stabilní šíření únavové trhliny je existence iniciační trhliny  $a_0$  v konstrukčním detailu, náchylném na vznik únavového poškození.

Výpočetní postupy sledování rychlosti růstu únavové trhliny založené na deterministickém pojetí jsou postupně doplňovány použitím pravděpodobnostních přístupů, které zohledňují nejistoty při stanovení vstupních proměnných veličin. Úpravou rovnice (1) a zavedením vztahu mezi rozkmitem napětí a faktorem intenzity napětí, což je podrobně popsáno např. v [10], pak lze dospět k akumulaci účinků zatížení:

$$S = \int_{N_0}^N C \cdot \Delta \sigma^m \cdot dN = C \cdot \Delta \sigma^m \cdot (N - N_0), \quad (2)$$

kde  $N$  je celkový počet rozkmitů špiček napětí  $\Delta\sigma$  a  $N_0$  představuje počet rozkmitů v čase inicializace únavové trhliny (většinou je roven nule), i k náhodně proměnné odolnosti konstrukce  $R$ :

$$R_{(a_1)} = \int_{a_0}^{a_1} \frac{da}{(\sqrt{\pi \cdot a} \cdot F_{(a)})^m}, \quad (3)$$

kde  $F_{(a)}$  je kalibrační funkce popisující průběh šíření únavové trhliny (např. z okraje či povrchu, [16]) a  $a_1$  konečná délka únavové trhliny (může být rovna  $a_d$  - velikost zaměřitelné únavové trhliny, nebo  $a_{ac}$  - rozměr přípustné únavové trhliny, určený na základě pevnostních kritérií a velikosti oslabené průřezové plochy nosného prvku).

Znalost účinků zatížení  $S$  i odolnosti konstrukce  $R$  umožňuje určit i funkci spolehlivosti a následně i pravděpodobnost poruchy  $P_f$ . Detailní popis teoretické podstaty pravděpodobnostního řešení šíření únavové trhliny byl v minulosti publikován např. v [10, 20, 22, 23]. Souvisí zejména s přesným definováním náhodných jevů, které mohou v konstrukci nastat v libovolném čase „ $t$ “ její životnosti:

- **Jev  $U_{(t)}$ :** V čase „ $t$ “ nebyla zjištěna žádná únavová trhlina, takže velikost únavové trhliny  $a_{(t)}$  ještě nedosáhla měřitelnou velikost  $a_d$  (detectable), takže platí:

$$a_{(t)} < a_d, \quad (4)$$

- **Jev  $D_{(t)}$ :** V čase „ $t$ “ byla zjištěna únavová trhlina, jejíž velikost  $a_{(t)}$  ale zatím nedosáhla přípustnou velikost  $a_{ac}$  (acceptable), takže platí:

$$a_d \leq a_{(t)} < a_{ac}, \quad (5)$$

- **Jev  $F_{(t)}$ :** V čase „ $t$ “ byla zjištěna porucha, neboť velikost únavové trhliny  $a_{(t)}$  dosáhla přípustnou velikost  $a_{ac}$ , takže platí:

$$a_{(t)} \geq a_{ac}. \quad (6)$$

Určení pravděpodobností těchto tří jevů  $U$ ,  $D$  a  $T$  vede k stanovení systému kontrol posuzované konstrukce. Vzhledem k nejistotě, která souvisí s předpokládaným rozměrem iniciační trhliny, ale i s dalšími nepřesnostmi, které vstupují do pravděpodobnostního výpočtu sledování růstu únavové trhliny, je významná zejména cílená, časově stanovená kontrola velikosti už zaměřitelných trhlín ( $a > a_d$ ).

Stanovení doby první prohlídky konstrukce  $t_1$ , zaměřené na únavové poškození v konstrukčních detailech nosného systému nejvíce náchylných na únavové poškození (např. v místech s největší koncentrací napětí), souvisí zejména s vypočteným přípustným rozměrem únavové trhliny a s určením pravděpodobnosti jevu  $F$ , která v době určované první prohlídky konstrukce překročí předepsanou návrhovou pravděpodobnost  $P_d$ . Analýza výsledků kontroly pak při nezjištění únavových trhlín během prohlídky vede k podmíněné pravděpodobnosti jejich vzniku, kterou lze s využitím věty o úplné pravděpodobnosti (blíže viz [11]) vyjádřit:

$$P(F_{(T)}|U_{(t_1)}) = \frac{P(F_{(T)}) - P(F_{(t_1)}) - P(D_{(t_1)})P(F_{(T)}|D_{(t_1)})}{P(U_{(t_1)})}, \quad (7)$$

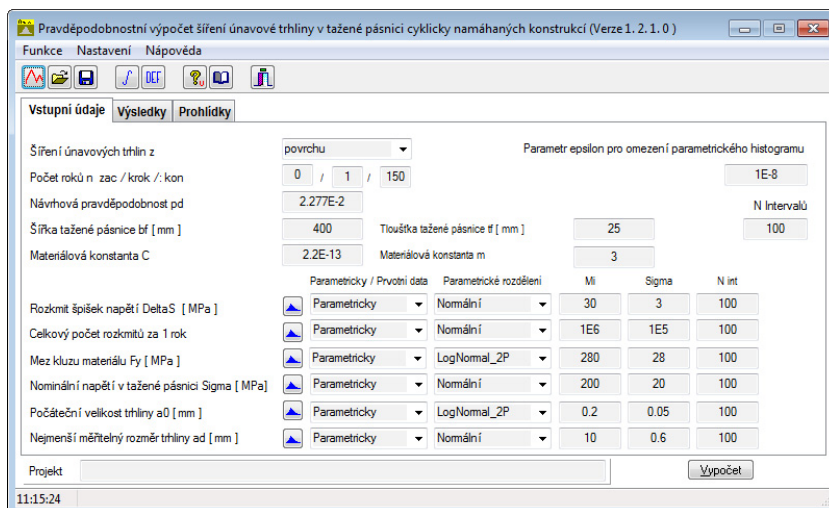
kde  $T > t_1$ . Pokud pravděpodobnost poruchy  $P_f$ , tedy pravděpodobnost jevu  $F$ , dosáhne předepsanou návrhovou hodnotu  $P_d$ , je navržena další prohlídka, zaměřená na zjištění únavové trhliny v příslušném konstrukčním prvku. Výsledkem prohlídky může být opět jeden ze tří uvedených jevů  $U$ ,  $D$  nebo  $F$  s odpovídající pravděpodobností. Celý výpočet lze tímto způsobem opakovat za účelem správného načasování dalších prohlídek konstrukce. Problematika již byla po teoretické stránce publikovaná v [5, 15, 18]. S využitím softwaru ProbCalc [2] pak bylo provedeno několik pravděpodobnostních studií, zaměřených na určení zmiňovaného systému kontrol na stávající mostní konstrukci [11].

Program ProbCalc [2] je určen, podobně jako např. software Nessus [19], k pravděpodobnostním úlohám a posudkům spolehlivosti s možností univerzálního definování výpočetního modelu. Pro specificky laděné pravděpodobnostní úlohy, jako je např. pravděpodobnostní výpočet šíření únavových trhlin, jsou však díky své obecnosti méně vhodné a uživatelsky značně náročné.

### 3 PRAVDĚPODOBNOSTNÍ VÝPOČET ŠÍŘENÍ ÚNAVOVÝCH TRHLIN S VYUŽITÍM PROGRAMU FCPROBCALC

S využitím výše popsaných postupů byla vytvořena softwarová aplikace FCProbCalc (zkratka Fatigue Crack Probability Calculation - [12], viz obrázek 1), která v uživatelsky příjemném prostředí umožňuje provést pravděpodobnostní výpočet šíření únavových trhlin z okraje a povrchu vedoucí k určení doby první prohlídky zaměřené na únavové poškození konstrukce. Analýza výsledků prohlídky konstrukce pak při nezjištění únavových trhlin vede k podmíněné pravděpodobnosti jejich vzniku (7) a určení času následných prohlídek.

Program FCProbCalc umožňuje potřebné vstupní veličiny vyjádřit deterministicky nebo stochasticky s využitím neparametrických (empirických) či parametrických rozdělení pravděpodobnosti (viz obrázek 1). Pro zadaný časový úsek pak lze stanovit účinek zatížení  $S$  podle (2), odolnosti konstrukce  $R(a_d)$  a  $R(a_{ac})$  podle (3), ale i pravděpodobnosti elementárních jevů  $U$ ,  $D$  a  $F$ , definovaných vztahy (4) až (6), které jsou výchozím pokladem pro stanovení času prohlídky.



Obr. 1: Pracovní plocha programu FCProbCalc pro zadání vstupních veličin

Výpočet odolnosti konstrukce  $R$  podle vztahu (3) lze v programu FCProbCalc prozatím provést pěti způsoby numerické integrace. K dispozici jsou:

- **Lichoběžníková metoda**, u níž lze volit počet diferencí  $n$  (přednastaveno  $n = 1000$ ),
- **Simpsonova metoda**, u které lze rovněž volit počet diferencí  $n$  (přednastaveno  $n = 1000$ ),
- **Rombergova metoda** s možností volby parametru  $n$  (přednastaveno  $n = 10$ ),
- **Adaptivní metoda**, u níž se zadává tolerance nepřesnosti  $tol_0$  (přednastaveno  $tol_0 = 1.10^{-4}$ ),
- **Gausova kvadratura** (pětibodová), přičemž se vzhledem k průběhu integrované funkce řešený interval  $a_0$  až  $a_d$ , resp  $a_{ac}$  rozdělí na tři samostatně integrované subintervaly v relativně vyjádřeném rozsahu 0 až 0,01; 0,01 až 0,1 a 0,1 až 1.

Dalšími volitelnými veličinami, které ovlivňují průběh pravděpodobnostního výpočtu, je počet intervalů (tříd)  $N$  každé vstupní veličiny a parametr  $\varepsilon$ , ovlivňující způsob omezení histogramů

s parametrickým rozdělením pravděpodobnosti (přednastavena hodnota  $\varepsilon = 1.10^{-8}$ , rozdělení se „usekne“ v bodě, kde je pravděpodobnost rovna  $\varepsilon$ ).

Při srovnávacím pravděpodobnostním výpočtu byla programem FCProbCalc proveden posudek dálničního ocelobetonového mostu z [11] v místě napojení příčniku na podélník. Převzaté vstupní veličiny byly přitom vyjádřeny deterministicky i stochasticky (viz tab. 1 a 2). Směrodatné odchylky prvních čtyř náhodných veličin v tab. 1 vychází ze zvoleného variačního koeficientu 10%, parametry v případě velikosti iniciační trhliny  $a_0$  a trhliny měřitelné  $a_d$  vychází z [22]. Požadovaná spolehlivost byla vyjádřena indexem spolehlivosti  $\beta=2$ , jehož hodnota odpovídá návrhové pravděpodobnosti poruchovosti  $P_d = 0,02277$ . Při výpočtu byla použita adaptivní metoda numerické integrace s parametrem  $tol_0 = 1.10^{-4}$ , počtem intervalů vstupních veličin  $N = 100$  a parametrem  $\varepsilon = 1.10^{-8}$ . Výpočet byl proveden pro únavové trhliny šířící se z okraje i povrchu a směřoval k určení prohlídek posuzované mostní konstrukce.

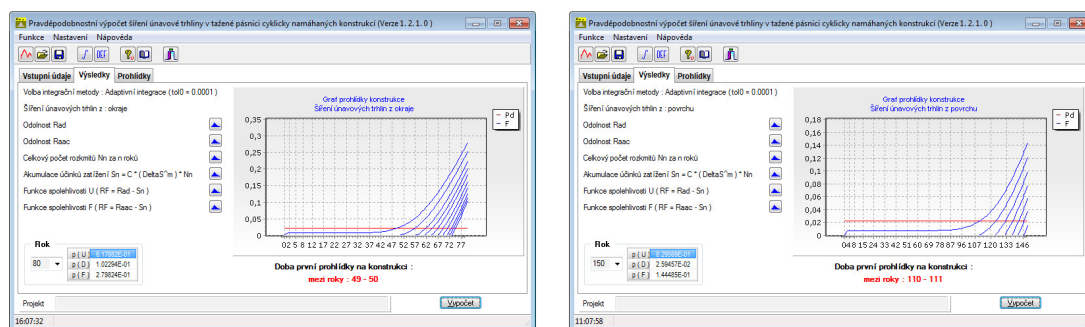
Tab. 1: Přehled variabilních vstupních veličin vyjádřených histogramem s parametrickým rozdělením pravděpodobnosti

| Veličina  | Parametrické rozdělení |                 |                     |
|---|------------------------|-----------------|---------------------|
|   | Typ                    | Parametry       |                     |
|   |                        | Střední hodnota | Směrodatná odchylka |
| Rozkmit špiček napětí $\Delta\sigma$ [MPa]        | Normální               | 30              | 3                   |
| Počet rozkmitů špiček napětí za jeden rok $N$ [-] | Normální               | $10^6$          | $10^5$              |
| Mez kluzu materiálu $f_y$ [MPa]                   | Lognormální            | 280             | 28                  |
| Nominální napětí v pásnici $\sigma$ [MPa]         | Normální               | 200             | 20                  |
| Počáteční velikost trhliny $a_0$ [mm]             | Lognormální            | 0,2             | 0,05                |
| Nejmenší měřitelný rozměr trhliny $a_d$ [mm]      | Normální               | 10              | 0,6                 |

Tab. 2: Přehled vstupních veličin vyjádřených deterministicky

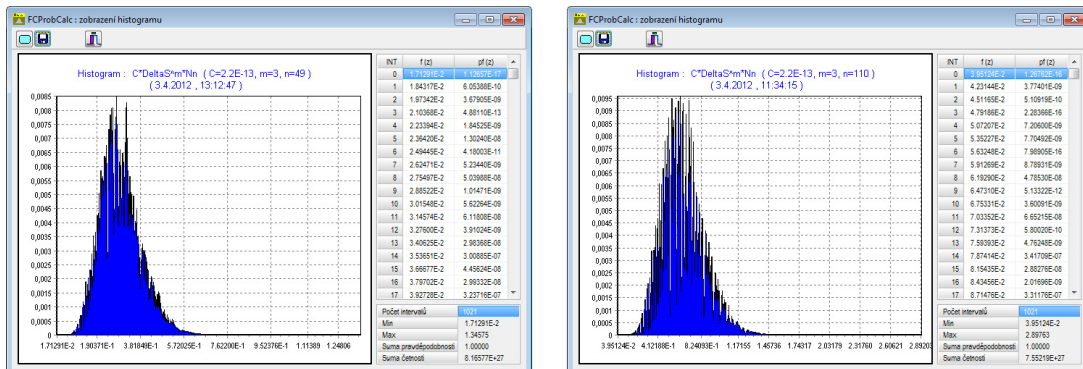
| Veličina                               | Hodnota              |
|--|----------------------|
| Materiálová konstanta $m$              | 3                    |
| Materiálová konstanta $C$              | $2,2 \cdot 10^{-13}$ |
| Šířka pásnice $b_f$ [mm]               | 400                  |
| Tloušťka pásnice $t_f$ [mm]            | 25                   |
| Návrhová pravděpodobnost poruchy $P_d$ | 0,02277              |

Na obrázku 2 jsou uvedeny ukázky pracovní plochy programu FCProbCalc, která obsahuje ikony pro zobrazení dílčích výsledných veličin, graf se závislostí pravděpodobnosti poruchy  $P_f$  na letech provozu konstrukce i vypočtený čas první prohlídky.

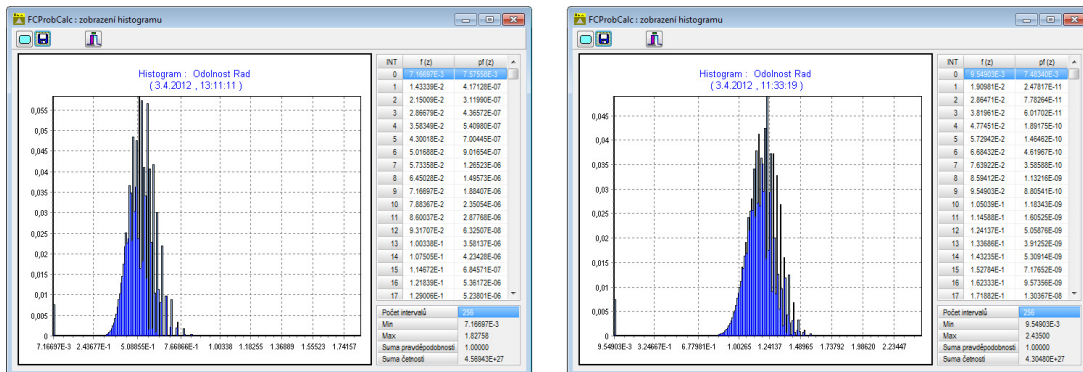


Obr. 2: Pracovní plocha program FCProbCalc se zobrazenými výsledky pravděpodobnostního výpočtu šíření únavové trhliny z okraje (vlevo) a z povrchu (vpravo)

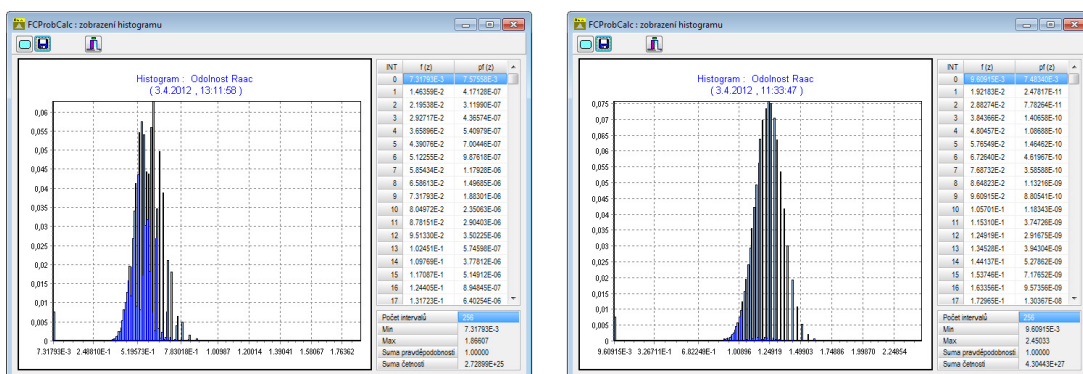
Na úkazku jsou na obrázcích 3 až 5 uvedeny výsledné histogramy pro účinky zatížení  $S$  v dobách první prohlídky i odolnosti konstrukce  $R(a_d)$  a  $R(a_{ac})$  – vždy pro šíření únavové trhliny z okraje (vlevo) či z povrchu (vpravo).



Obr. 3: Výsledný histogram účinku zatížení  $S$  pro 49 let provozu mostní konstrukce (vlevo), resp. 110 let provozu mostní konstrukce (vpravo)



Obr. 4: Výsledný histogram odolnosti posuzované mostní konstrukce  $R(a_d)$ , namáhané únavovou trhlinou z okraje (vlevo), resp. z povrchu (vpravo)

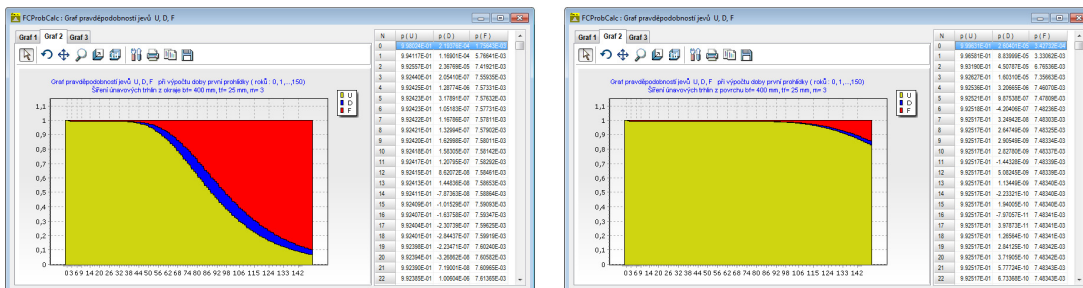


Obr. 5: Výsledný histogram odolnosti posuzované mostní konstrukce  $R(a_{ac})$ , namáhané únavovou trhlinou z okraje (vlevo), resp. z povrchu (vpravo)

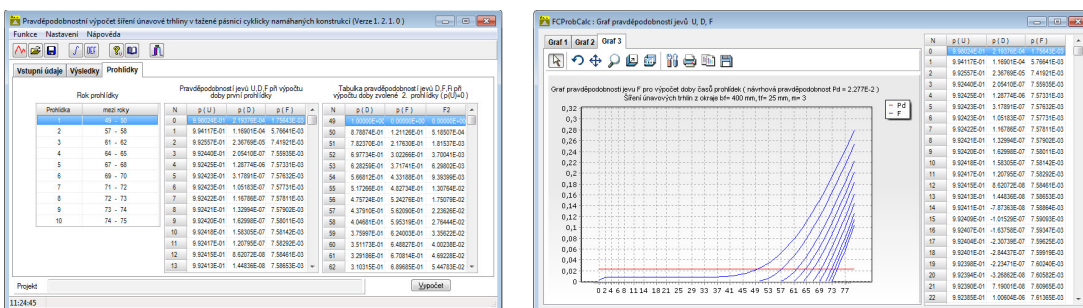
Obrázek 6 pak obsahuje pro oba typy šíření únavové trhliny (z okraje i povrchu) grafy s vypočtenými pravděpodobnostmi jevů  $U$ ,  $D$  a  $F$ , definovaných vztahy (4) až (6). Všechny tři jevy tvoří úplný prostor všech možných jevů, které mohou nastat v čase „t“, a platí tedy:

$$P(U_{(t)}) + P(D_{(t)}) + P(F_{(t)}) = 1, \quad (8)$$

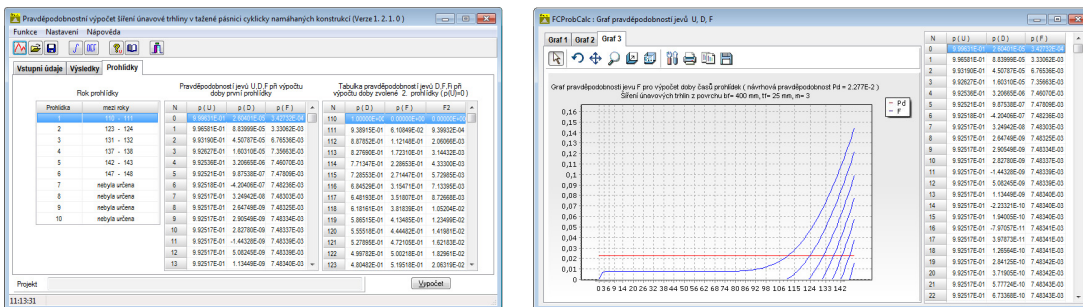
což je zřejmé i na grafech z obrázku 6.



Obr. 6: Graf vypočtených pravděpodobností elementárních jevů  $U$ ,  $D$  a  $F$  pro 0 až 150 let provozu cyklicky namáhané mostní konstrukce



Obr. 7: Závislost pravděpodobnosti poruchy  $P_f$  na letech provozu mostu při pravděpodobnostním výpočtu šíření únavové trhliny z okraje (0 až 80 let) s přihlédnutím k podmíněné pravděpodobnosti a určení doby první i následujících prohlídek mostní konstrukce



Obr. 8: Závislost pravděpodobnosti poruchy  $P_f$  na letech provozu mostu při pravděpodobnostním výpočtu šíření únavové trhliny z povrchu (0 až 150 let) s přihlédnutím k podmíněné pravděpodobnosti a určení doby první i následujících prohlídek mostní konstrukce

Výsledné časy první prohlídky i prohlídek následujících, které byly stanoveny s využitím podmíněné pravděpodobnosti (7), jsou uvedeny na obrázku 7 (únavová trhlina z okraje) a obrázku 8 (únavová trhlina z povrchu). Oba obrázky obsahují tabulku s číselnými hodnotami výsledných časů

prohlídek a pravděpodobností jevů  $U$ ,  $D$  a  $F$ , ale také graf se závislostí pravděpodobnosti poruchy  $P_f$  na letech provozu mostu.

Pro zvolenou Adaptivní metodu numerické integrace jsou výsledné časy navrhovaných prohlídek uvedeny v tabulce 3.

Tab. 3: Vypočtené doby první i následujících prohlídek mostní konstrukce při šíření únavových trhlin z okraje a z povrchu

| Pořadové číslo prohlídky | Čas prohlídky v letech   |                           |
|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
|                          | Únavová trhlina z okraje | Únavová trhlina z povrchu |
| 1.                       | <b>49</b>                | <b>110</b>                |
| 2.                       | <b>57</b>                | <b>123</b>                |
| 3.                       | <b>61</b>                | <b>131</b>                |
| 4.                       | <b>64</b>                | <b>137</b>                |
| 5.                       | <b>67</b>                | <b>142</b>                |
| 6.                       | <b>69</b>                | <b>147</b>                |
| 7.                       | <b>71</b>                | nebyla určena             |
| 8.                       | <b>72</b>                | nebyla určena             |
| 9.                       | <b>73</b>                | nebyla určena             |
| 10.                      | <b>74</b>                | nebyla určena             |

#### 4 ZÁVĚRY

V této práci bylo poukázáno na vývoj pravděpodobnostních metod a jejich využití v oblasti posudku spolehlivosti konstrukcí se zaměřením na nově vyvíjenou pravděpodobnostní metodu POPV. Ukazuje se, že metoda POPV je vhodná nejenom pro úlohy vedoucí k posouzení spolehlivosti, ale také k jiným pravděpodobnostním výpočtům, jako např. souhrnně teoreticky i prakticky zpracovaná metodika pravděpodobnostního přístupu k řešení šíření únavových trhlin z okraje i povrchu se zaměřením na jejich největší přípustný rozměr a návrh pravidelného systému prohlídek konstrukce.

Tyto výpočetní postupy byly aplikovány v programu FCProbCalc, s jehož využitím bylo pravděpodobnostně posouzeno únavové poškození řešené mostní konstrukce pro případ šíření únavových trhlin z okraje a povrchu. Byly stanoveny časy prohlídek mostní konstrukce, zaměřených na sledování vzniku daných typů únavových trhlin. Jejich porovnáním se mj. potvrdila skutečnost, že rychlost šíření únavové trhliny z povrchu je podstatně pomalejší nežli u únavové trhliny z okraje.

Relativně složitý algoritmus metody POPV klade zvláštní nároky na teoretické i uživatelské schopnosti počítače. Je nutno znát alespoň v základních rysech podstatu algoritmu metody, což má vliv na způsob definice výpočetního modelu a volbu vhodné optimalizační techniky. Tento nedostatek je odstraněn v případě tvorby aplikačního softwaru „na míru“ konkrétní pravděpodobnostní úlohy (např. software Anchor, viz [4]), jak tomu bylo i v případě programu FCProbCalc.

Je nutno zmínit, že možnosti metodiky POPV ještě nejsou zdaleka vyčerpány. Jako oblast dalšího bádání se ukazuje použití statisticky závislých vstupních veličin s přímým zadáváním do výpočetního algoritmu, posouzení spolehlivosti konstrukčních systémů a rozvoj numerických postupů, jenž zefektivní použití metody POPV např. při maticových výpočtech.

V případě rozvoje metodiky pravděpodobnostního výpočtu únavového poškození cyklicky namáhaných konstrukcí se dalším výzkumným cílem jeví zejména aplikace pokročilejších numerických postupů pro integrování odolnosti konstrukce a jejich optimalizace z hlediska požadované přesnosti a strojového času výpočtu, použití dynamických Bayesových sítí ve výpočetním modelu popisujícím šíření únavových trhlin a doplnění výpočetních postupů o další typy únavových poškození cyklicky namáhané ocelové konstrukce.



## ZÁVĚREČNÁ POZNÁMKA

Lite verze program FCProbCalc, stejně jako ostatní softwarové produkty aplikující metodu POPV, jsou ke stažení na adrese <http://www.fast.vsb.cz/popv>.

## PODĚKOVÁNÍ

Projekt byl realizován za finanční podpory z prostředků koncepčního rozvoje vědy, výzkumu a inovací pro rok 2012 přidělených VŠB-TU Ostrava Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

## LITERATURA

- [1] ANDERSON, T. L. *Fracture mechanics: fundamentals and applications*. Third edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, 2005. ISBN 0-8493-1656-1.
- [2] JANAS, P. & KREJSA, M. & KREJSA, V. *Software ProbCalc [EXE] - Program System for Probabilistic Reliability Assessment using DOProC method*. Autorizovaný software, Lite verze 1.2, Ev.č. 003/27-01-2009\SW. VŠB-TU Ostrava, 2008.
- [3] JANAS, P. & KREJSA, M. & KREJSA, V. Using the Direct Determined Fully Probabilistic Method for determination of failure. In *European Safety and Reliability Conference Esrel 2009*, sborník příspěvků. Praha, 7. až 10. září 2009: Civil-Comp Press, 2009. Reliability, Risk and Safety: Theory and Applications. Taylor & Francis Group, London, 2010. Editoři Briš, Guedes Soares a Martorell. pp. 1467-1474 (8 p). ISBN 978-0-415-55509-8 (sada 3 knih + CD-ROM).
- [4] JANAS, P. & ŠŇUPÁREK, R. & KREJSA, M. & KREJSA, V. Využití metody PDPV k navrhování kotevní výztuže důlních děl. In *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava, řada stavební*. Číslo 1, rok 2009, ročník IX, článek č. 21, pp. 10. ISSN 1213-1962.
- [5] CHEN, N. Z. & WANG, G. & SOAREZ, C. G. Palmgren-Miner's rule and fracture mechanics-based inspection planning. *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 78, issue 18, pp. 3166–3182 (17 p), DOI 10.1016/j.engfracmech.2011.08.002, December 2011.
- [6] FISHER, J. W. & KULAK, G. L. & SMITH, I. F. C. *A Fatigue Primer for Structural Engineers*. National Steel Bridge Alliance, U.S.A., May 1998.
- [7] KALA, Z. Sensitivity Analysis of the Stability Problems of Thin-Walled Structures. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 61, issue 3, pp 415–422 (8 p), DOI 10.1016/j.jcsr.2004.08.005, 2005.
- [8] KONECNY, P. & TIKALSKY, P. J. & TEPKE, D. G. Performance Evaluation of Concrete Bridge Deck Affected by Chloride Ingress. *Transportation Research Record*, issue 2028, pp. 3–8 (6 p), DOI 10.3141/2028-01, 2007.
- [9] KRÁLIK, J. & KRÁLIK, J. Seismic Analysis of Reinforced Concrete Frame-Wall Systems Considering Ductility Effects in Accordance to Eurocode. *Engineering Structures*, vol. 31, issue 12, pp. 2865–2872 (8 p), DOI 10.1016/j.engstruct.2009.07.029, 2009.
- [10] KREJSA, M. & TOMICA, V. Calculation of Fatigue Crack Propagation Using DOProC Method. In *Transactions of the VŠB - Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series*. No.1, 2010, Vol.X, paper #11 (9 s). DOI 10.2478/v10160-010-0011-6. Publisher Versita, Warsaw, ISSN 1213-1962 (Print) 1804-4824 (Online).
- [11] KREJSA, M. & TOMICA, V. Determination of Inspections of Structures Subject to Fatigue. In *Transactions of the VSB – Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series*. No.1, 2011, vol.XI, paper #7 (11 p), DOI 10.2478/v10160-011-0007-x. Publisher Versita, Warsaw, ISSN 1213-1962 (Print) ISSN 1804-4824 (Online).

- [12] KREJSA, M. & KREJSA, V. *Program FCProbCalc [EXE] - Program pro pravděpodobnostní výpočet šíření únavových trhlin*. Autorizovaný software, Lite verze 1.1, 2,0 MB. Ev.č. 008/14-11-2011\_SW. VŠB-TU Ostrava, 2011.
- [13] KŘIVÝ, V. Calculation of corrosion allowances on weathering steel bridges. In *Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series*. No.1, 2011, Vol.XI, paper #8, pp. 11. DOI 10.2478/v10160-011-0008-9. Publisher Versita, Warsaw, ISSN 1213-1962 (Print) ISSN 1804-4824 (Online).
- [14] KUBECKA, K. Utilisation of Risk Analysis Methods in Decision – Making Process on Fitness of Rehabilitation. *Stavebnictví*, pp. 26–31 (6 p), 2010. ISSN 1802-2030, EAN 977180220300501.
- [15] MOAN, T. Reliability-based management of inspection, maintenance and repair of offshore structures. *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 1, issue 1, pp 33–62 (30 p), DOI 10.1080/15732470412331289314, Taylor & Francis Ltd., March 2005.
- [16] SANFORD, R. J. *Principles of Fracture Mechanics*. Pearson Education, Inc., U.S.A., 2003. ISBN 0-13-092992-1.
- [17] ŠEJNOHA, J. & NOVOTNÁ, E. & ŠPAČKOVÁ, O. Pragmatické modely selhání staveb v nadloží tunelů. In *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava, řada stavební*. Číslo 1, rok 2011, ročník XI, pp. 10. ISSN 1213-1962.
- [18] STRAUB, D. Stochastic Modeling of Deterioration Processes through Dynamic Bayesian Networks. *Journal of Engineering Mechanics*. 2009, (11 p). DOI: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000024.
- [19] THACKER, B. H. & RIHA, D. S. & FITCH, S. H. K. & HUYSE, L. J. & PLEMING, J. B. Probabilistic Engineering Analysis Using the NESSUS software. *Structural Safety*, vol. 28, issue 1–2, pp 83–107 (25 p), 2006, DOI 10.1016/j.strusafe.2004.11.003.
- [20] TOMICA, V. & KREJSA, M. Optimal Safety Level of Acceptable Fatigue Crack. In *5<sup>th</sup> International Probabilistic Workshop*, sborník referátů. Ghent, Belgie, 28. až 29. listopad 2007. Editoři L.Taerwe a D.Proske. (12 p). ISBN 978-3-00-022030-2.
- [21] TOMICA, V. & KREJSA, M. Možnost pravděpodobnostního výpočtu únavové trhliny metodou PDPV. In *Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series*. No.1, 2007, Vol.VII, pp. 211-220 (20 p). ISSN 1213-1962; ISBN 978-80-248-1661-6.
- [22] TOMICA, V. & KREJSA, M. & GOCÁL, J. Přípustná únavová trhlinka - teorie a aplikace. In *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava, řada stavební*, číslo 1, rok 2008, ročník VIII. VŠB-TU Ostrava, Stavební fakulta, 2008. Články č. 9 a 10. pp. 103-124 (20 p). ISBN 978-80-248-1883-2, ISSN 1213-1962.
- [23] TOMICA, V. & KREJSA, M. Únavová odolnost v metodě přípustných poškození. In *Sborník referátů 22. české a slovenské mezinárodní konference Ocelové konstrukce a mosty 2009*. Brněnské výstaviště, 23. až 25. září 2009: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2009. Editoři J. Melcher, J. Skyva a M. Karmazínová. pp. 327-332 (6 p). ISBN 978-80-7204-635-5.

#### **Oponentní posudek vypracoval:**

Prof. Ing. Jiří Šejnoha, DrSc., Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze.

Prof. Ing. Zdeněk Kala, Ph.D., Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně.