

PHD WORKSHOP 2022 – VARIANTNÍ POSOUZENÍ ÚNAVY BETONU MOSTNÍ KONSTRUKCE

Miklas Petr, *

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.
petr.miklas@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

Príspevek se zabývá únavovým posouzením předpjaté betonové nosné konstrukce železničního mostu přes Chodovskou ulici v Praze pomocí několika postupů uvedených v ČSN EN 1992 a Model Code 2010.

První část se věnuje výpočtu dlouhodobých účinků zatížení na předpjatou nosnou konstrukci mostu.

Ve druhé části je uveden postup pro stanovení rozkmitů napětí a následně vytvoření spektra rozkmitů napětí na základě namáhání od reálných vlakových souprav.

Hlavní část je pak věnována jednotlivým posudkům předpjaté konstrukce na únavu. V práci je uvedeno celkem sedm postupů. Postupy jsou v práci uváděny od zjednodušených, které vycházejí z časté kombinace zatížení, přes postupy využívající například ekvivalentního rozkmitu napětí až k obtížnějším postupům, u kterých je nutné stanovit spektrum rozkmitů napětí a následně jej posoudit pomocí Palmgren-Minerova pravidla.

KLÍČOVÁ SLOVA

Únava betonu • Posouzení únavy betonu • Spektrum rozkmitů napětí • Eurokódy • Model Code 2010 • Palmgren-Minerovo pravidlo

ABSTRACT

This paper is focused on a fatigue assessment of concrete a superstructure of the railway bridge over Chodovská street in Prague, using several procedures given in ČSN EN 1992 and Model Code 2010.

The first part describes calculations of the effects of longterm actions on a prestressed bridge structure.

The second part of this paper describes a procedure for determining stress fluctuations and then set up of stress-range spectrum based on effects of actual trains. This spectrum is then used for a fatigue verification of concrete.

The main part of the paper is then devoted to various fatigue verifications of the structure – totally seven procedures are presented here. Individual procedures are presented from simplified ones using frequent combinations of actions, to

more difficult procedures, which are based on individual stress-range spectra.

KEYWORDS

Fatigue of concrete • Verification of fatigue of concrete • Stress-range spectrum • Eurocodes • Model Code 2010 • Palmgren-Miner rule

1. ÚVOD

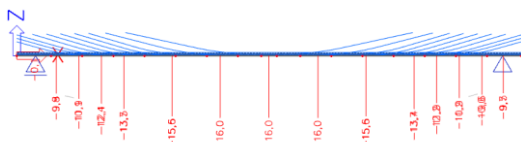
Cílem práce je posouzení únavy betonu na reálné mostní konstrukci. Jedná se o nosnou konstrukci železničního mostu přes Chodovskou ulici v Praze.

V první části je popsán výpočet dlouhodobých účinků zatížení na mostní konstrukci. Je popsán postup výpočtu modulem TDA ve SCIA Engineer. V závěru této kapitoly jsou pak uvedeny dosažené výsledky, které jsou následně využity pro další výpočet.

Druhá část se věnuje výpočtu a stanovení spekter rozkmitů napětí od skutečných vlakových souprav, které přes most přejely v během jednoho měsíce. Lze říci, že tuto skladbu vlakových souprav lze považovat za reprezentativní během celé životnosti mostu. Nejprve jsou stanoveny horní a dolní napětí během přejezdu všech vlakových souprav. Poté jsou tato napětí roztržena do jednotlivých spekter rozkmitů napětí. Spektra rozkmitů napětí jsou následně využita pro posouzení únavy betonu pomocí Palmgren-Minerova pravidla.

V hlavní části práce jsou uvedena všechna posouzení únavy nosné konstrukce mostu. Jsou zde uvedeny jednotlivé popisy všech dostupných postupů posouzení včetně výsledků jednotlivých posouzení. Celkem je v práci uvedeno sedm postupů posouzení. Čtyři jsou uvedeny v ČSN EN 1992. Další tři postupy jsou převzaty z Model Code 2010. Nejprve je uveden výpočet únavové pevnosti betonu v tlaku, a následně jednotlivé postupy. Tyto postupy jsou uvedeny od zjednodušených metod, které využívají například jen časté kombinace zatížení, přes metody využívající ekvivalentního rozkmitu napětí až po metody obtížnější využívající například Palmgren-Minerova pravidla. V závěru jsou jednotlivá posouzení porovnána tak, aby byl patrný rozdíl mezi jednotlivými posudky.

* Školitel: doc. Ing. Roman Šafář, Ph.D.



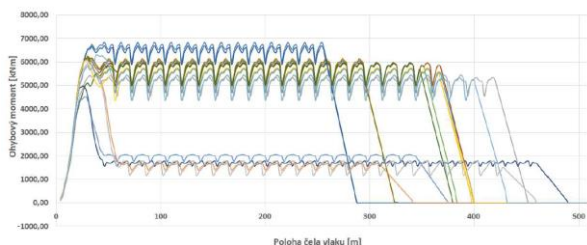
Obrázek 6: Průběh napětí betonu v dolních vláknech nosné konstrukce na konci životnosti

3. STANOVENÍ NAPĚTÍ A SPEKTRA ROZKMITŮ NAPĚTÍ V NOSNÉ KONSTRUKCI

3.1. Stanovení maximálních a minimálních napětí v nosné konstrukci od skutečných vlakových souprav

Maximální a minimální hodnoty normálových napětí byly stanoveny pro nejkritičtější průřez nosné konstrukce, který se nachází ve staničení 16 m. Tato napětí byla získána od skutečných vlakových souprav, které přejezly přes nosnou konstrukci mostu v červnu roku 2016. Jedná se o zhruba 600 vlakových souprav jak nákladních, tak osobních vlaků (Správa železnic, s.o. 2016). Data lze považovat za reprezentativní pro celou dobu životnosti mostu.

Nejprve byly stanoveny ohybové momenty během průjezdu všech těchto vlakových souprav. Z ohybových momentů byla následně vypočtena napětí v horních i dolních vláknech. Napětí byla vypočtena v horních i dolních vláknech během celého průjezdu všech vlakových souprav. Na obr. 7 je znázorněn graf s průběhem ohybových momentů v nosné konstrukci při průjezdu několika celých vlakových souprav.



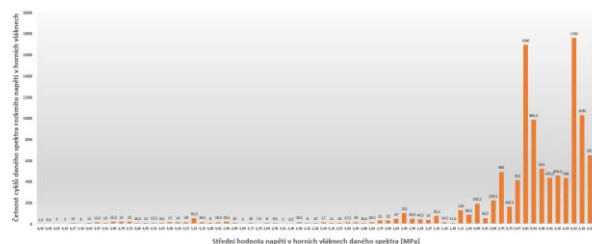
Obrázek 7: Průběh ohybových momentů v nosné konstrukci mostu během průjezdu několika vlakových souprav

Z grafu je vidět, že v konstrukci dochází k velkému nárůstu ohybového momentu během nájezdu lokomotivy vlakové soupravy a následně při nájezdu následujících vagonů dochází pouze k menšímu kolísání ohybových momentů a napětí v závislosti na aktuální poloze vagonů na mostě. Patrný rozdíl pak tvoří fakt, zda jsou vagony těžké – plně naložené nebo jestli jsou prázdné.

3.2. Stanovení spektra rozkmitů napětí

Ze získaných ohybových momentů během průjezdu všech uvedených vlakových souprav bylo cílem stanovit spektrum rozkmitů napětí. Pro jeho stanovení byla využita metoda stékajícího deště.

Nejprve byly seřazeny všechny ohybové momenty během průjezdu každé vlakové soupravy za sebe, z nich bylo následně pomocí metody stékajícího deště odvozeno spektrum rozkmitů napětí. Pro tyto účely byly ohybové momenty rozděleny do intervalů po 100 kNm. Na základě těchto ohybových momentů byly spočítány hodnoty normálových napětí v horních a v dolních vláknech nosné konstrukce, které byly následně využity pro posouzení únavy betonu pomocí Palmgren-Minerova pravidla. Spektrum rozkmitů napětí v horních vláknech je zobrazeno na obr. 8.



Obrázek 8: Spektrum rozkmitů napětí v horních vláknech

Z grafu je patrné, že největšího počtu cyklů je dosahováno v nižších úrovních napětí. Ve vyšších úrovních napětí je počet cyklů poměrně nízký.

4. POSOUZENÍ ÚNAVOVÝCH ÚČINKŮ DLE ČSN EN 1992-1-1 A ČSN EN 1992-2

Nejprve je nutné pro všechna posouzení stanovit únavovou pevnost betonu. V ČSN EN 1992 je uveden následující vztah (ČSN EN 1992-1-1, 2019):

$$f_{cd,fat} = 0,85 * \beta_{cc(t_0)} * f_{cd} * \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \quad (1)$$

$f_{cd,fat}$ je návrhová únavová pevnost betonu v tlaku
 f_{cd} návrhová pevnost betonu v tlaku (při jednorázovém namáhání)
 f_{ck} charakteristická pevnost betonu v tlaku
 β_{cc} vliv stáří betonu v době začátku opakovaného zatížení
 Únavová pevnost betonu daného prefabrikovaného prvku vychází 19,856 MPa

4.1. Zjednodušená metoda ověření únavy betonu v tlaku dle ČSN EN 1992-1-1, čl. 6.8.7. (2)

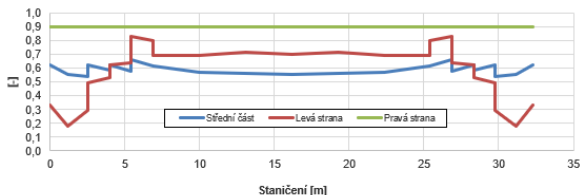
V této metodě se využívá častá kombinace zatížení. Z časté kombinace se pak musí stanovit maximální tlakové normálové napětí v konstrukci. Ve stejném místě se poté stanoví i minimální tlakové napětí (pokud by toto napětí vycházelo tahové, v posouzení únavy betonu se uvažuje nulová hodnota). Jedná se o poměrně jednoduchou metodu, kde postačí stanovit pouze únavovou pevnost betonu a maximální a minimální hodnotu napětí v příslušné kombinaci zatížení. Lze říci, že její výsledky vycházejí méně příznivě, než u metod podrobnějších. Ověření únavy betonu se posuzuje dle vztahu 2.

$$\frac{\sigma_{c,max}}{f_{cd,fat}} \leq 0,5 + 0,45 \frac{\sigma_{c,min}}{f_{cd,fat}} \leq 0,9 - \text{pro } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad (2)$$

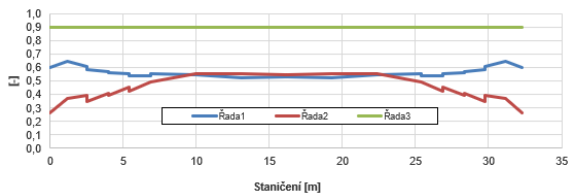
$$\leq 0,8 - \text{pro } f_{ck} > 50 \text{ MPa}$$

$\sigma_{c,max}$ maximální tlakové napětí při časté kombinaci
 $\sigma_{c,min}$ minimální tlakové napětí při časté kombinaci, pokud je napětí tahové, dosazujeme 0

Konstrukce byla tímto postupem posouzena a bylo zjištěno, že konstrukce při takovémto posouzení nevyhovuje v horních ani dolních vláknech. Výsledky posouzení v horních i v dolních vláknech jsou znázorněny na obr. 9 a obr. 10. V dolních vláknech konstrukce nevyhovuje pouze nepatrně. Pokud se modrá část (střední část nerovnice pro posouzení) nenachází mezi červenou a zelenou, potom konstrukce při posouzení únavy betonu zjednodušenou metodou nevyhovuje.



Obrázek 9: Posouzení konstrukce na únavu v horních vláknech dle ČSN EN 1992-1-1 čl. 6.8.7. (2)



Obrázek 10: Posouzení konstrukce na únavu v dolních vláknech dle ČSN EN 1992-1-1 čl. 6.8.7. (2)

4.2. Ověření únavy betonu podle ČSN EN 1992-1-1, čl. 6.8.7 (1)

Tuto metodu je možno použít pro posouzení únavy betonu mostů pozemních komunikací, pro které není – na rozdíl od mostů železničních – v EN jiný postup uveden. Výsledky bývají příznivější, než výsledky získané dle čl. 6.8.7 (2).

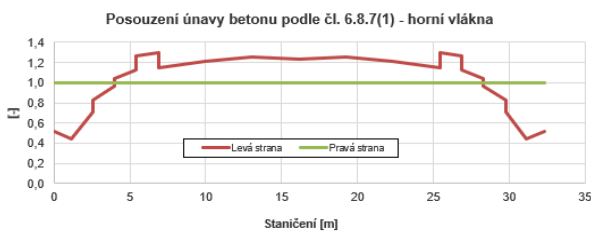
$$E_{cd,max,eq} + 0,43\sqrt{1 - R_{eq}} \leq 1 \quad (3)$$

$E_{cd,max,eq}$ největší úroveň tlakového napětí

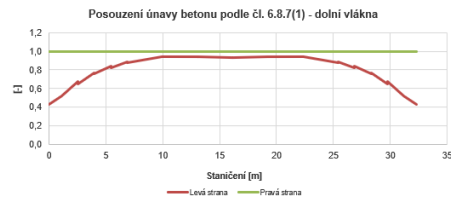
$E_{cd,min,eq}$ nejmenší úroveň tlakového napětí

R_i poměr největšího a nejmenšího napětí

Graficky jsou výsledky posouzení uvedeny na obr. 11 a obr. 12.



Obrázek 11: Posouzení konstrukce na únavu v horních vláknech dle ČSN EN 1992-1-1 čl. 6.8.7. (1)



Obrázek 12: Posouzení konstrukce na únavu v dolních vláknech dle ČSN EN 1992-1-1 čl. 6.8.7. (1)

Po dokončení posouzení bylo zjištěno, že konstrukce dle uvedeného postupu nevyhovuje při ověření na únavu v horních vláknech stejně jako u metody v čl. 4.1. tohoto příspěvku. Při posouzení dle uvedené rovnice v dolních vláknech ovšem vyhovuje, což je rozdíl oproti zjednodušené metodě, kde konstrukce nevyhověla ani v dolních vláknech. Pokud vyjde levá strana rovnice vyšší než 1, potom konstrukce nevyhovuje, což je patrné z obou uvedených grafů.

Rozdíl mezi oběma posouzeními je pravděpodobně dán zpřesněným postupem výpočtu podle této metody. Z grafu posouzení konstrukce v horních vláknech je patrné, že konstrukce nevyhovuje zhruba o 30 %. V dolních vláknech konstrukce při posouzení vyhovuje s rezervou zhruba 5 %.

4.3. Postup posouzení únavy dle ČSN EN 1992-2, příloha NN pro tlacený beton železničních mostů

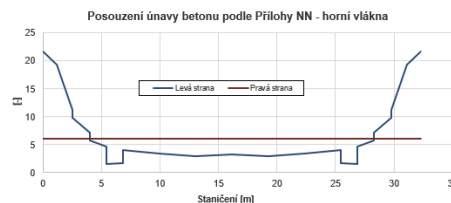
Pro železniční mosty existuje způsob pro posouzení únavy betonu, který využívá také tzv. ekvivalentní poškozující rozkmit napětí. Pro posouzení je nutné znát roční objem dopravy, návrhovou životnost mostu a počet kolejí. Posouzení únavy betonu se provede dle vztahu 4.

$$14 * \frac{1 - E_{cd,max,eq}}{\sqrt{1 - R_{eq}}} \geq 6 \quad (4)$$

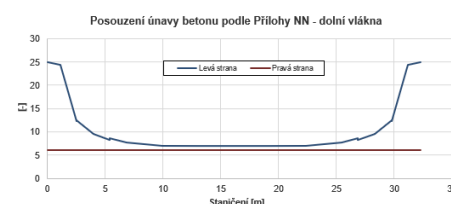
R_{eq} poměr maximální a minimální úrovně tlakového napětí

$E_{cd,max,eq}$ maximální úroveň tlakového napětí

Výsledky vynesení jsou vyneseny na obr. 13 a obr. 14 pro horní i dolní vlákna. Pokud při daném posouzení bude levá část rovnice menší než 6, pak konstrukce nevyhovuje. V grafu posouzení to pak znamená, že konstrukce nevyhovuje, pokud je modrá čára pod červenou čarou.



Obrázek 13: Posouzení konstrukce na únavu v horních vláknech dle ČSN EN 1992-2 příloha NN



Obrázek 14: Posouzení konstrukce na únavu v dolních vláknech dle ČSN EN 1992-2 příloha NN

Výsledky posouzení jsou v tomto případě obdobné, jako při předchozím posouzení uvedeném v kap. 4.2., tzn. v horních vláknech konstrukce nevyhověla a v dolních vláknech vyhověla s rezervou zhruba 15 %.

4.4. Ověření únavy pomocí součinitele únavového poškození dle ČSN EN 1992-2, čl. 6.8.7

Tato metoda využívá Palmgren-Minerova pravidla. Je tedy potřeba znát spektra rozkmitů napětí. Z rovnice 5 můžeme stanovit počet cyklů napětí potřebný pro únavové poškození, který závisí na působícím napětí a na únavové pevnosti betonu. Získané počty cyklů se následně dosadí do Palmgren-Minerova pravidla, kde se vyhodnotí únavové poškození konstrukce. Tato metoda je tedy poměrně náročná na množství potřebných dat a na pracnost.

$$N_i = 10^{14 * (1 - \frac{E_{cd,max,i}}{\sqrt{1 - R_i}})} \quad (5)$$

- N_i počet cyklů napětí potřebný pro únavové poškození betonu
 R_i poměr maximální a minimální úrovně tlakového napětí
 $E_{cd,max,i}$ maximální úroveň tlakového napětí

Touto metodou byla konstrukce posouzena v nejkritičtějším průřezu ve staničení 16 m – v blízkosti středu rozpětí. Konstrukce v tomto průřezu byla posouzena opět v horních i dolních vláknech, přičemž konstrukce nevyhověla v horních ani v dolních vláknech. Konstrukce v obou případech nevyhověla více než 10x. Metoda se zdá být velmi citlivá na velikost střední hodnoty napětí a bude podrobena dalšímu zkoumání.

5. POSOUZENÍ ÚNAVOVÝCH ÚČINKŮ DLE OFICIÁLNÍ VERZE MODEL CODE 2010

Pro posouzení únavy betonu metodami uvedenými v oficiální verzi Model Code 2010 je nutné znát η_c . Jedná se o tzv. průměrný faktor zohledňující gradient napětí v tlakové zóně úseku betonového průřezu. Tento součinitel se vypočte pomocí rovnice 6 (Model Code 2010, 2013).

$$\eta_c = \frac{1}{1,5 - 0,5 * (\frac{|\sigma_{c1}|}{|\sigma_{c2}|})} \quad (6)$$

- $|\sigma_{c1}|$ minimální hodnota tlakového napětí ve vzdálenosti 300 mm od povrchu při příslušné kombinaci zatížení,
 $|\sigma_{c2}|$ maximální hodnota tlakového napětí ve vzdálenosti 300 mm od povrchu při příslušné kombinaci zatížení (stejně jako u $|\sigma_{c1}|$)

5.1. Zjednodušená metoda ověření únavy betonu dle Model Code 2010, čl. 7.4.1.3 – Level II

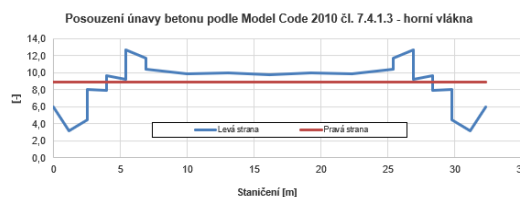
Jako první je zde uvedena zjednodušená metoda ověření betonu na únavu. Tato metoda využívá časté kombinace zatížení. Posouzení se provede dle vztahu 7. Pro posouzení je nutné znát průměrný faktor gradientu napětí,

únavovou pevnost betonu v tlaku a maximální hodnotu napětí při časté kombinaci.

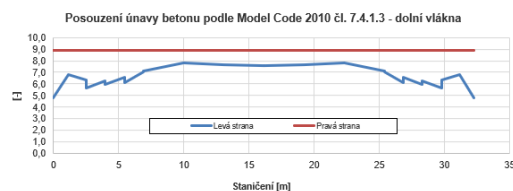
$$Y_{Ed} * \sigma_{c,max} * \eta_c \leq 0,45 * f_{cd,fat} \quad (7)$$

- $\sigma_{c,max}$ maximální tlakové napětí při časté kombinaci
 η_c průměrný faktor zohledňující gradient napětí v tlakové zóně úseku betonového průřezu

V následující části na obr. 15 a obr. 16 jsou zobrazeny grafy posouzení dle uvedené metody. Vodorovná červená čára znázorňuje pravou stranu rovnice (únavovou odolnost), zatímco modrá čára znázorňuje únavové namáhání, tzn. levou stranu rovnice.



Obrázek 15: Posouzení konstrukce na únavu v horních vláknech dle Model Code 2010 – Level II



Obrázek 16: Posouzení konstrukce na únavu v dolních vláknech dle Model Code 2010 – Level II

Z výsledků je patrné, že posouzení únavy betonu vychází příznivěji než u zjednodušených metod dle ČSN EN 1992. V horních vláknech konstrukce opět nevyhověla, ovšem v dolních vláknech konstrukce vyhověla s rezervou 15 %.

5.2. Ověření únavy betonu dle Model Code 2010, čl. 7.4.1.4 – Level III

Tato metoda porovnává požadovanou životnost konstrukce s předpokládanou dobou životnosti (počet cyklů n); je založena na ekvivalentním poškozujícím rozkmitu napětí. Pro splnění podmínky musí být splněna nerovnost ze vztahu 8. V tomto vztahu se porovnává skutečný předpokládaný počet rozkmitů napětí o určité výši během životnosti konstrukce s počtem cyklů (o stejné úrovni napětí), kterým je schopna konstrukce odolat, než dojde ke kolapsu konstrukce. Počet cyklů pro posouzení byl zvolen 2×10^6 .

$$n \leq N \quad (8)$$

Předpokládaný počet cyklů napětí v tlaku během životnosti konstrukce se vypočte dle rovnice 9 a rovnice 10.

$$\log N_1 = \frac{8}{Y-1} * (S_{cd,max} - 1) \quad (9)$$

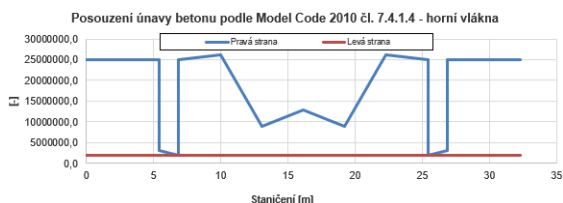
$$\log N_2 = 8 + \frac{8 * \ln(10)}{Y-1} * (Y - S_{cd,min}) * \log\left(\frac{S_{cd,max} - S_{cd,min}}{Y - S_{cd,min}}\right) \quad (10)$$

V konstrukci se vyskytovala i tahová namáhání. Počet cyklů životnosti v tahu se pak vypočte dle rovnice 11.

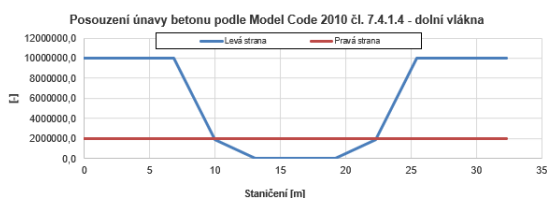
$$\log N = 12 * (1 - S_{td,max}) \quad (11)$$

$S_{cd,max}$	maximální úroveň tlakového napětí
$S_{cd,min}$	minimální úroveň tlakového napětí
$S_{td,max}$	maximální úroveň tahového napětí

V obr. 17 a obr. 18 jsou graficky uvedeny výsledky posouzení. Modrou čarou je znázorněn počet cyklů potřebný pro poškození konstrukce při daném rozkmitu napětí. Červenou čarou je zvolený minimální počet cyklů, jemuž musí konstrukce odolat - 2×10^6 .



Obrázek 17: Posouzení konstrukce na únavu v horních vláknech dle Model Code 2010 – Level III



Obrázek 18: Posouzení konstrukce na únavu v dolních vláknech dle Model Code 2010 – Level III

Z uvedených grafů posouzení je vidět, že konstrukce při posouzení touto zpřesněnou metodou v horních vláknech vyhovuje. Konstrukce nevyhovuje pouze v průřezech, ve kterých dochází v dolních vláknech k tahovému namáhání. To znamená, že konstrukce vyhovuje ve všech vláknech, kde dochází i při minimálním napětí k tlaku. Na rozdíl od metod uvedených v Eurokódu, metody uvedené v Model Code 2010 umožňují i posouzení únavy taženého betonu, které v tomto případě nevyhovuje. V dalším postupu výzkumu bude porovnán výsledek této metody s výsledky, které budou dosaženy při dosazení do této stejné metody pouze s tím rozdílem, že místo tahových namáhání bude dosazena 0.

5.3. Ověření únavy betonu dle Model Code 2010, čl. 7.4.1.5 – Level IV

Tato metoda je založena na spektru napětí stanoveném na základě reálného namáhání konstrukce a pro posouzení využívá Palmgren-Minerova pravidla. Jedná se o postup, který by měl být nejvýstižnější z uvedených postupů v Model Code 2010 a měl by se nejvíce přibližovat skutečnému únavovému působení. Hodnoty potřebné pro stanovení odolnosti konstrukce jsou pro beton počítány přímo z únavové pevnosti betonu. Po stanovení spektra napětí v konstrukci se provede posouzení dle rovnice 12.

$$D = \sum_{i=1}^j \frac{n_{Ei}}{N_{Ri}} \quad (12)$$

D	únavové poškození
n_{Ei}	použitý počet napětíových cyklů s rozkmitem skutečné úrovně napětí
N_{Ri}	počet cyklů rozkmitů napětí, který je schopen odolat danému rozkmitu napětí

Touto metodou byla konstrukce obdobně jako při ověření podle ČSN EN 1992 posouzena v nejkritičtějším průřezu 16 m, a to jak v horních, tak i dolních vláknech. Při tomto posouzení konstrukce v horních i v dolních vláknech s výraznou rezervou vyhověla. Metoda bude rovněž podrobena dalšímu zkoumání.

6. ZÁVĚR

Práce se zabývá posouzením únavy betonu několika metodami. Jedná se o čtyři metody uvedené v ČSN EN 1992 a tři metody uvedené v Model Code 2010. Z výsledků posouzení je vidět, že v ČSN EN 1992 i v Model Code 2010 jsou zjednodušené metody vždy znatelně konzervativnější. Podrobnější metody využívající ekvivalentního rozkmitu napětí poskytují výsledky příznivější, avšak ani u těchto posouzení konstrukce nevyhověla, byť pouze v horních vláknech. Nejpřesnější z použitých metod jsou metody založené na využití Palmgren-Minerova pravidla. U těchto metod došlo ke značným výkyvům výsledků, kdy při posouzení dle ČSN EN 1992 konstrukce výrazně nevyhověla, ovšem při posouzení dle Model Code 2010 konstrukce vyhověla s výraznou rezervou. Metody budou podrobeny ještě dalšímu zkoumání.

Závěrem lze říci, že při jednotlivých posouzeních dochází v některých případech ke značně různorodým výsledkům a je tedy vhodné nadále pokračovat ve zkoumání únavového chování betonu a jeho posuzování. Výsledkem dizertační práce by měla být doporučení pro zpřesnění posouzení únavy betonu, především u existujících konstrukcí.

PODĚKOVÁNÍ

Práce vznikla za podpory SGS 2019 a SGS 2020 a i nadále pokračuje. Dále je poděkování věnováno doc. Ing. Romanu Šafářovi, Ph.D. za jeho odborné vedení a užitečné rady při zpracování této práce.

Reference

- ČSN EN 1990 Eurokód: *Zásady navrhování konstrukcí*
- ČSN EN 1991-1-1 Eurokód 1: *Zatížení konstrukcí – Část 1-1: Obecná zatížení – Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb*
- ČSN EN 1991-2 Eurokód 1: *Zatížení konstrukcí – Část 2: Zatížení mostů dopravou*
- ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: *Navrhování betonových konstrukcí*
- ČSN EN 1992-2 Eurokód 2: *Navrhování betonových konstrukcí – Část 2: Betonové mosty – Navrhování a konstrukční zásady*
- Archivní dokmunetace mostu Chodovská TU 0206 km 3,007, TSK Praha*
- Podklady přejezdů jednotlivých vlakových souprav přes most Chodovská, Správa železnic, státní organizace fib, (2013), Model Code 2010 for Concrete Structures 2010. ISBN 978-3-433-60409-0*