

# Únavová odolnost betonových mostních konstrukcí

Petr Miklas<sup>1</sup>  
Roman Šafář<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ČVUT v Praze, Fakulta stavební; Thákurova 2077, 166 29 Praha 6; petr.miklas@fsv.cvut.cz

<sup>2</sup> ČVUT v Praze, Fakulta stavební; Thákurova 2077, 166 29 Praha 6; roman.safar@fsv.cvut.cz

Grant: SGS22/036/OHK1/1T/11

Název grantu: Navrhování a zesilování betonových mostů - zpřesnění a ověření vybraných postupů

Oborové zaměření: JM – Inženýrské stavitelství

© GRANT Journal, MAGNANIMITAS Assn.

**Abstrakt** Příspěvek se zabývá únavovou odolností betonových mostů a možnostmi zpřesnění postupů pro posuzování betonu na únavu. V současné době se často stává, že betonové konstrukce - zejména železničních mostů - ve většině případů výrazně nevyhovují při posouzení betonu na únavu i přes to, že tyto konstrukce nevykazují únavová porušení - z toho je patrné, že únava betonu dosud není dostatečně prozkoumána. Příspěvek se snaží odhalit možné příčiny rozporu mezi reálným stavem konstrukcí a výsledky dosud dostupných výpočetních postupů. Jsou zde popsány účinky skutečných účinků vlakových souprav na konkrétní mostní konstrukci. Na základě dostupných poznatků příspěvek nabízí doporučení pro zpřesnění únavových posouzení betonových konstrukcí ve formě možné redukce únavového zatížení či postupu pro posouzení založeného na zpracování a přímém využití reálných Wöhlerových křivek.

**Klíčová slova** Wöhlerovy křivky, únava betonu, Palmgren-Minerovo pravidlo, posuzování únavy betonu

## 1. ÚVOD

Příspěvek se zabývá výzkumem únavové odolnosti betonových konstrukcí. Z doposud dostupných výsledků je patrné, že problematika únavové odolnosti betonových konstrukcí není dosud dostatečně prozkoumána. Toto zjištění plyne z faktu, že stávající konstrukce - zejména železničních mostů - ve většině případů při posouzení betonu na únavu výrazně nevyhovují, ačkoliv nevykazují poruchy, které by mohly s únavou betonu souviset. Proto je vhodné se touto problematikou a jejím rozvojem i nadále zabývat. V první části příspěvku je stručně popsána problematika únavové odolnosti betonových konstrukcí včetně popisu průběhu jednotlivých fází procesu únavového porušení.

Druhá část příspěvku se věnuje nejprve popisu posuzované předpjeté mostní konstrukce, poté výpočtu účinků skutečných vlakových souprav na tuto konstrukci a v závěru výpočtu spektra rozkmitů napětí v této konstrukci. V další kapitole druhé části jsou popsány výsledky provedených únavových posouzení této mostní konstrukce standardními metodami.

Třetí část se věnuje popisu a následnému využití Wöhlerových křivek z publikovaných výsledků experimentů při posuzování betonu na únavu včetně porovnání těchto křivek s dosaženými

výsledky provedených posouzení. V druhé části kapitoly jsou představeny další možnosti obdobného posouzení ve formě Goodmanových a Smithových křivek.

V poslední části tohoto příspěvku jsou představena dvě doporučení pro úpravu stávajících postupů při ověřování únavové odolnosti betonových konstrukcí. Prvním doporučením je na základě získaných výsledků stanovení ekvivalentní vlakové soupravy pro posuzování betonu na únavu, která lépe vystihuje skutečné únavové zatížení železničních mostních konstrukcí. Další možností, která bude v dalším výzkumu rovněž rozpracována, je stanovení (upřesnění) vhodného součinitele pro úpravu účinků Modelu zatížení 71 při posuzování únavy. Druhým doporučením je představení nového možného postupu pro stanovení únavové odolnosti betonu na základě využití co nejrealnějších Wöhlerových křivek. Postup je založen na využití experimentálně stanovených Wöhlerových křivek a jejich následné přípravě pro použití prostřednictvím parametrizace pomocí čtyř koeficientů. Výsledkem výpočtu je počet cyklů napětí potřebných pro únavové porušení konstrukce.

## 2. ÚNAVOVÁ ODOLNOST BETONU

Řešení únavové odolnosti betonových konstrukcí je komplexní problematika zabývající se na jedné straně správným stanovením odpovídajícího únavového zatížení a jeho účinků, na straně druhé se pak jedná o správné stanovení únavové odolnosti dané betonové konstrukce.

### 2.1 Proces únavy betonu

Únava materiálu je proces stálých změn v materiálu, který je vystaven cyklickému zatěžování. U únavy betonu hraje velkou roli oproti kovovým materiálům fakt, že se jedná o heterogenní materiál, navíc s velice rozdílným působením v tlaku a v tahu. Na únavové chování betonu mají dále vliv i další faktory, jako je dotvarování, množství trhlin, počáteční koncentrace napětí apod. Mikrotrhliny a trhliny vyskytující se v materiálu se mohou vlivem opakovaného namáhání postupně slučovat a vést až ke změně mechanických vlastností. Vlivem těchto procesů může po určitém počtu cyklů dojít ke kolapsu konstrukce i bez dosažení meze únosnosti při jednorázovém namáhání.

## 2.2 Vývoj působení cyklicky zatíženého betonového prvku

Proces únavy betonu se dělí do tří základních fází. Nejprve dochází k iniciaci trhlin, následně ke stabilnímu šíření trhlin a v závěrečné fázi před kolapsem k nestabilnímu šíření trhlin. První fáze iniciace trhlin představuje zhruba 10 % zatěžovacích cyklů. V této fázi dochází k vysokému nárůstu přetvoření. Druhá fáze stabilního šíření trhlin je nejdelší. Jedná se o středních zhruba 80 % zatěžovacích cyklů. Během této fáze dochází k pozvolnému rovnoměrnému nárůstu přetvoření. Během této fáze se pomalu zvětšují stávající trhliny a zároveň se tvoří trhliny nové. Třetí fáze nestabilního šíření trhlin je přibližně stejně dlouhá jako fáze první. Po ukončení této fáze ovšem dochází ke kolapsu konstrukce. Je charakterizována rychlým nárůstem přetvoření před kolapsem.

## 3. ÚČINKY REÁLNÝCH VLAKOVÝCH SOUPRAV

V první části této kapitoly je zde stručně popsána zkoumaná předpjatá mostní konstrukce přes Chodovskou ulici v Praze, která byla vybudována v roce 1962. Dále je zde popsán postup stanovení nejprve napětí v této nosné konstrukci během průjezdu více než 600 vlakových souprav. Dále pak výpočet spektra rozkmitů napětí. Jedná se o skutečné údaje o všech vlakových soupravách, které během jednoho měsíce (červen 2016) přes posuzovaný most přejezly. [8] Data lze považovat za reprezentativní pro celou dobu životnosti mostu.

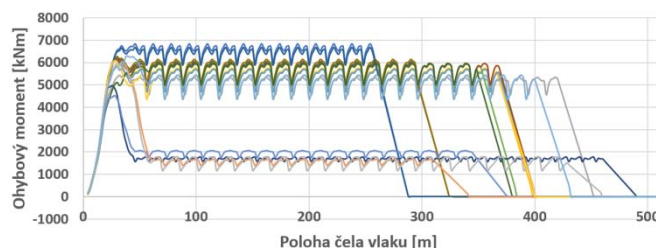
### 3.1 Popis posuzované mostní konstrukce

Jedná se o konstrukci z prefabrikovaných předpjatých betonových nosníků – celkem jsou v konstrukci použity čtyři komorové nosníky. Každý komorový nosník je složen ze dvou prefabrikovaných polonosníků průřezu „I“, spojených podélnou dobetonávkou horní i dolní desky. Rozpětí nosné konstrukce je 30 m. Beton prefabrikované a monolitické části této mostní konstrukce je dle dřívějšího značení druh 500 (dnes C 35/45). Nosníky jsou proměnného průřezu. Výška průřezu je uprostřed rozpětí 1750 mm a v ose uložení 1450 mm. Každý komorový nosník je předepnut pomocí 58 předpínacích kabelů. Jedná se o předpínací kabely složené z dvaceti patentovaných drátů o průměru 4,5 mm s pevností v tahu 1650 MPa. (Archivní dokumentace mostu 1960). Most byl dokončen v roce 1961 [9].

### 3.2 Stanovení ohybových momentů v konstrukci od skutečných vlakových souprav

Maximální a minimální hodnoty normálových napětí byly stanoveny pro nejkritičtější průřez nosné konstrukce, který se nachází v průřezu ve staničení 16 m (měřeno od čela nosníků), což je těsně vedle středu rozpětí, které je ve staničení 15 m. Nejkritičtější průřez tedy není přesně uprostřed rozpětí pole - z důvodu podélného střechovitého sklonu povrchu hlavních nosníků.

Nejprve byly stanoveny ohybové momenty během průjezdu všech těchto vlakových souprav. Z ohybových momentů byla následně vypočtena napětí v horních i dolních vláknech během celého průjezdu všech vlakových souprav. Na obr. 1 je znázorněn graf s průběhem ohybových momentů v nosné konstrukci v průřezu 16 m (nejnamáhanější průřez) při průjezdu několika celých vlakových souprav.



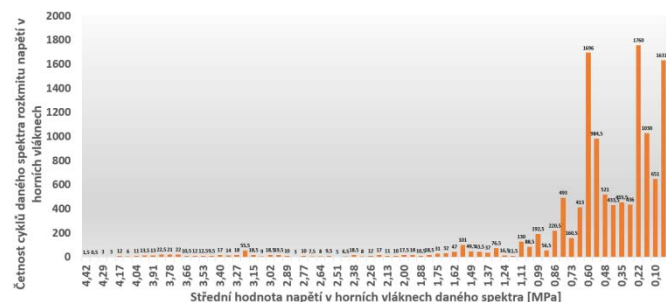
Obrázek 1: Průběh ohybových momentů v nosné konstrukci v průřezu 16 m během průjezdu několika vybraných vlakových souprav

Z grafu je vidět, že v konstrukci dochází k velkému nárůstu ohybového momentu během nájezdu lokomotivy vlakové soupravy, zatímco při nájezdu následujících vagonů dochází již 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.

### 3.3 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. Spektrum rozkmitů napětí bylo stanovováno pro zatížení dopravou včetně předpětí, vlastní tíhy konstrukce a ostatního stálého zatížení.

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, které byly následně využity pro posouzení únavy betonu pomocí Palmgren-Minerova pravidla. Spektrum rozkmitů napětí v horních vláknech v průřezu 16 m je zobrazeno na obr. 2.



Obrázek 2: Spektrum rozkmitů napětí v horních vláknech rozhodujícího průřezu

## 4. POSOUZENÍ ÚNAVY BETONU

Při standardním posouzení nosné konstrukce mostu na únavu je nutné pro všechna posouzení stanovit nejprve únavovou pevnost betonu. Únavová pevnost betonu daného prefabrikovaného prvku dle normového postupu (normy řady ČSN EN 1992) vychází 19,856 MPa. Pro posouzení byly využity nejprve čtyři doporučené postupy dle ČSN EN 1992 a dále tři postupy uvedené v Model Code 2010 (fib), kde jsou metody do určité míry principiálně podobné, nikoliv však stejné.

Lze konstatovat, že při zjednodušených posouzeních a v posouzeních využívající ekvivalentní rozkmit napětí konstrukce nevyhověla, přesto však nevykazuje jakékoliv únavové poškození. Následně tedy byla provedena další posouzení, a to s využitím Wöhlerových křivek, dostupných z dosud provedených a publikovaných únavových experimentů. Pokud není uvedeno jinak, uvažuje se v následujících posouzeních únava betonu namáhaného tlakem.

#### 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 časté kombinace zatížení. Z časté kombinace se pak musí stanovit maximální a minimální tlakové normálové napětí v konstrukci. V případě, že by minimální napětí vycházelo tahové, uvažuje nulová hodnota. Jedná se o poměrně jednoduchou metodu, kde stačí 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. Konstrukce byla tímto postupem posouzena a bylo zjištěno, že konstrukce při takovémto posouzení nevyhovuje v horních ani dolních vláknech. V dolních vláknech konstrukce nevyhovuje pouze nepatrně zhruba o 5 %, ovšem v horních vláknech konstrukce nevyhovuje výrazně, a to zhruba o 40 %. [1]

#### 4.2 Metoda využívající ekvivalentního rozkmitu napětí dle 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. Pro železniční mosty lze využít postupu uvedeného v kap. 4.3 tohoto článku. Výsledky bývají příznivější než u zjednodušené metody. Po dokončení posouzení bylo zjištěno, že konstrukce dle uvedeného postupu nevyhovuje při ověření na únavu v horních vláknech stejně jako u metody zjednodušené. Při posouzení v dolních vláknech konstrukce ovšem vyhovuje. Lze říci, že metoda je oproti předcházející metodě poněkud náročnější na výpočet, poskytuje ale příznivější a zřejmě přesnější výsledky. V horních vláknech konstrukce nevyhovuje zhruba o 30 %. V dolních vláknech konstrukce při posouzení vyhovuje s rezervou zhruba 5 %. [1]

#### 4.3 Postup posouzení únavy dle ČSN EN 1992-2 pro tlačený beton železničních mostů, Příloha NN 3.2

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. 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 %. [2]

#### 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 spektrum rozkmitu napětí. Získané počty cyklů napětí 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.

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 proto byla podrobena dalšímu zkoumání.

Po drobné úpravě doporučeného normového postupu tak, aby postup odpovídal skutečnému chování betonových konstrukcí, byla konstrukce posouzena opět v horních i dolních vláknech upraveným postupem. Při tomto posouzení konstrukce vyhověla s výraznou rezervou v horních i v dolních vláknech. Z výsledku je patrné, že největší vliv na výsledek má střední hodnota napětí a rozkmit napětí. Jelikož výsledek tohoto posouzení je velmi podobný výsledku dosaženému dle posouzení v Model Code 2010 – Level IV, lze předpokládat, že upravený postup je postup blízký se reálnému chování konstrukce při únavovém zatížení. [2] Postup však bude ještě podroben podrobnému rozboru.

#### 4.5 Zjednodušená metoda ověření únavy betonu dle Model Code 2010 – Level II

Jako první z metod uvedených v Model Code 2010 je zde uvedena zjednodušená metoda ověření betonu na únavu. Tato metoda využívá časté kombinace zatížení. Pro posouzení je nutné znát průměrný faktor gradientu napětí, únavovou pevnost betonu v tlaku a maximální hodnotu napětí při časté kombinaci. Posouzení únavy betonu touto metodou vychází příznivěji než u zjednodušených metod uvedených v ČSN EN 1992. V horních vláknech konstrukce opět nevyhověla, ovšem v dolních vláknech konstrukce již vyhověla s rezervou 15 %. [3]

#### 4.6 Ověření únavy betonu dle Model Code 2010 – Level III

Tato metoda porovnává požadovanou životnost konstrukce s předpokládanou dobou životnosti (počet cyklů  $n$ ) a je založena na ekvivalentním poškozujícím rozkmitu napětí. Při tomto posouzení se reálné rozkmitu napětí v konstrukci nahradí jedním ekvivalentním rozkmitem, o kterém lze předpokládat, že má na konstrukci stejné únavové účinky. Tento tzv. ekvivalentní poškozující rozkmit napětí se pak porovnává s rozkmitem, kterému je při daném počtu cyklů konstrukce schopna odolat, než dojde k jejímu kolapsu. Počet cyklů pro posouzení byl zvolen  $2 \times 10^6$ , což je hodnota, která bývá pro únavová posouzení mostů často uvažována. V konstrukci se vyskytovala i tahová namáhání.

Konstrukce při posouzení tlačeného betonu touto zpřesněnou metodou v horních vláknech vyhovuje. Konstrukce nevyhovuje pouze v průřezích, ve kterých dochází v dolních vláknech i k tahovému namáhání, nevyhovuje ovšem z hlediska únavy při rozkmitěch tahových namáhání. Na rozdíl od metod uvedených v Eurokódu, metody uvedené v Model Code 2010 umožňují i posouzení únavy nejen tlačeného, ale i taženého betonu, které v tomto případě nevyhovuje. Únavovým porušením taženého betonu by zřejmě byl vznik tahových trhlin, a to i při menším zatížení, než které by odpovídalo mezi vzniku trhlin při jednorázovém namáhání. Jedná se tedy spíše o problém trvanlivostní, který je ale neméně důležitý než problém přímé únosnosti.

V dalším postupu výzkumu byl výpočet zopakován, ale s tím rozdílem, že místo tahových namáhání byla dosazena hodnota 0. Při dosažení hodnoty 0 místo tahových napětí bylo zjištěno, že konstrukce vyhovuje ve všech horních i dolních vláknech konstrukce (tzn. vyhovuje z hlediska rozkmitu tlakových napětí).

Lze tedy říci, že únavová odolnost betonu proti rozkmitům tlakových napětí je vyšší než odolnost proti rozkmitům tahových napětí. [3]

#### 4.7 Ověření únavy betonu dle Model Code 2010 – Level IV

Tato metoda je založena na posouzení spektra rozkmitů napětí stanoveného na základě reálného namáhání konstrukce s využitím 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 působení konstrukcí, stejně jako obdobná metoda v ČSN EN 1992. [3]

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 tak, jako u upraveného postupu v ČSN EN 1992. Postup bude ještě podroben podrobnému rozboru.

### 5. POROVNÁNÍ A POSOUZENÍ VÝSLEDKŮ S WÖHLEROVÝMI KŘIVKAMI

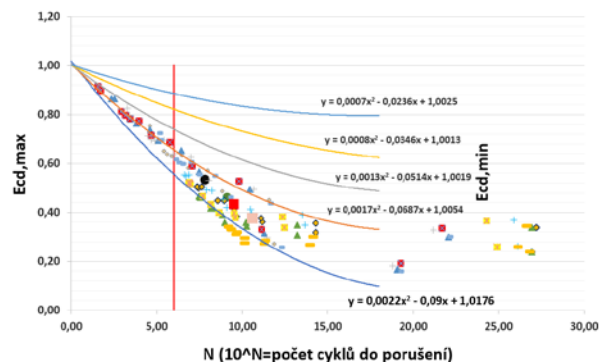
Vzhledem k faktu, že konstrukce nevyhověla v žádném zjednodušeném postupu ani v postupu využívajícím ekvivalentního rozkmitu napětí se tato kapitola zabývá porovnáním dosažených výsledků přímo s dostupnými výsledky ve formě Wöhlerových křivek, které byly převzaty z experimentálních zkoušek provedených a publikovaných dalšími autory zabývajícími se únavovou odolností betonových konstrukcí. Výsledkem tohoto srovnání je poté porovnání počtu cyklů do porušení konstrukce. V první části kapitoly je představeno porovnání výsledků z posouzení s Wöhlerovými křivkami z reálných experimentů pro zprávnější představy o skutečném chování betonových konstrukcí při únavovém (cyklickém) zatížení. Wöhlerovy křivky by měly představovat nejpřesnější postup pro zjišťování skutečného počtu cyklů o daném rozkmitu napětí, který je potřeba k dosažení únavové odolnosti dané betonové konstrukce.

V druhé části této kapitoly jsou představeny další možné postupy pro výpočet počtu cyklů do porušení ve formě Goodmanových a Smithových křivek.

#### 5.1 Porovnání výsledků s Wöhlerovými křivkami pro posouzení betonu na únavu

Tato kapitola se věnuje porovnání dosažených výsledků s Wöhlerovými křivkami, které představují základ prakticky pro jakékoliv posuzování materiálu na únavu, zde jsou však použity „přímo“, což lze považovat za dosud nejpřesnější postup pro stanovení počtu cyklů napětí do porušení posuzované betonové konstrukce. Nejprve bylo seskupeno několik dostupných Wöhlerových křivek publikovaných různými autory, kteří tyto křivky sestrojili na základě vlastních experimentálních výzkumů. [4,5,6,7] Provedení rozsáhlých experimentálních únavových zkoušek pro sestrojení množství Wöhlerových křivek je velmi časově i finančně náročné. Z tohoto důvodu bylo přednostně využito již dostupných – publikovaných experimentálních výsledků. Z tohoto množství grafů od různých autorů byl sestrojen jeden reprezentativní graf Wöhlerových křivek zohledňující všechny dostupné experimentální výsledky. Tento graf je znázorněn na obr. 3. Do grafu byly pro posouzení doplněny v závislosti na  $E_{cd,min}$  a  $E_{cd,max}$  (minimální a maximální úroveň tlakového napětí) výsledky popsání v kap. 4. Z grafu lze jednoduše odečíst počet cyklů do

porušení u jednotlivých posouzení. Na vodorovné ose se nachází exponent  $N$ , kdy po dosazení do jednoduchého vztahu  $10^N$  dostaneme počet cyklů napětí při dané horní a dolní úrovni napětí, který je potřebný pro dosažení meze únavové odolnosti betonové konstrukce.



Obrázek 3: Reprezentativní Wöhlerovy křivky z experimentálních zkoušek (převzaty z publikovaných výsledků od dalších autorů) s výsledky únavových posouzení dle ČSN EN 1992 a Model Code 2010

Z grafu na obr. 4 je vidět, že při dosazení výsledků posouzení dle ČSN EN 1992 a Model Code 2010 do Wöhlerových křivek některá posouzení nevyhovují pro počet cyklů  $10^6$  (tzn. nacházejí se v grafu vlevo od svislé červené přímky). Jedná se především o zjednodušené posudky a posudky využívající ekvivalentního poškozujícího rozkmitu napětí. Zjednodušená posouzení vycházejí z časté kombinace zatížení. Pro posouzení založená na ekvivalentním poškozujícím rozkmitu napětí se využívají další podrobnosti, jako návrhová životnost, umístění posuzovaného průřezu v konstrukci (v poli, nad podporou, ...) apod. a uvažuje se zde rovněž hmotnost vlakových souprav včetně nákladu, která po mostě přejede za rok. Lze však říci, že vliv této hmotnosti na výsledky výpočtu je minimální a výpočetní postup bude vhodné podrobit dalšímu zkoumání a zřejmě zpřesnění.

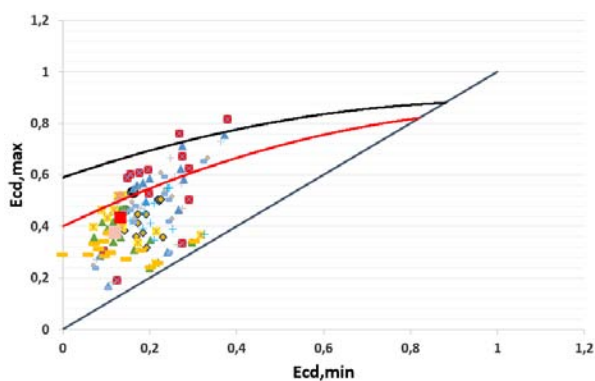
Hodnoty uvedených Wöhlerových křivek jsou znázorněny včetně redukčního součinitele materiálu pro beton, který je stanoven hodnotou 1,5, tedy stejně jako pro jednorázová namáhání (v souladu s ČSN EN 1992).

#### 5.2 Další možné postupy výpočtu pomocí Goodmanových a Smithových křivek

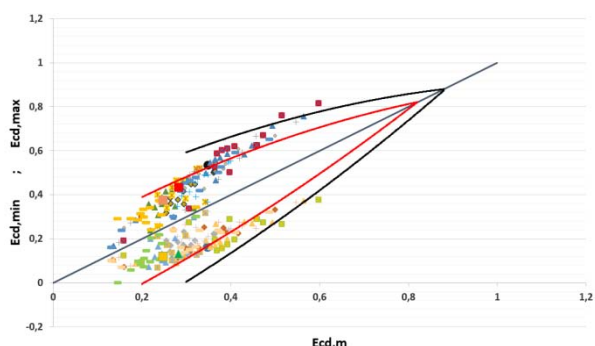
Dalšími obdobnými způsoby pro stanovení počtu cyklů do porušení v závislosti na rozkmitu napětí jsou například Goodmanovy nebo Smithovy křivky. Jedná se o obdobu více využívanějších Wöhlerových křivek.

Goodmanovy křivky znázorňují opět závislost minimální a maximální úrovně napětí na osách a jednotlivé křivky pak zobrazují mocnité  $N$  (pro určení odpovídajícího počtu cyklů). V případě, že se bod vytvořený mezi  $E_{cd,min}$  a  $E_{cd,max}$  nachází uvnitř této uzavřené křivky, pak posudek pro daný počet cyklů vyhovuje.

Smithovy křivky fungují obdobným způsobem, pouze s tím rozdílem, že na vodorovné ose se nachází střední hodnota napětí. Na svislé ose pak nalezneme  $E_{cd,min}$  a  $E_{cd,max}$  (hodnoty vyjadřující úroveň napětí – podrobnosti jsou v MC 2010 [3] a ČSN EN 1992 [2]). Oba popsané typy křivek včetně posouzení jsou znázorněny na obr. 4 a obr. 5. [4]



Obrázek 4: Goodmanovy křivky pro stanovení počtu cyklů do porušení



Obrázek 5: Smithovy křivky pro stanovení počtu cyklů do porušení

## 6. DOPORUČENÉ ÚPRAVY POSTUPŮ PRO POSUZOVÁNÍ BETONU NA ÚNAVU

Vzhledem k dosaženým výsledkům jsou připravována doporučení pro úpravu stávajících postupů posuzování betonových konstrukcí na únavu. V této kapitole jsou uvedena dvě dosud zpracovaná hlavní doporučení. Prvním je doporučení zakládající se na redukci únavového zatížení využívaného v jednotlivých posudcích. Toto doporučení vzniklo na základě výsledků z posouzení a zjištění sil a rozložení jednotlivých náprav skutečných vlakových souprav. Popis vzniku a výsledku tohoto doporučení je popsán v *kap. 6.1*.

Druhým doporučením je návrh nového přístupu k posuzování betonových konstrukcí na únavu. Tento postup využívá přímým způsobem Wöhlerovy křivky popsané v *kap. 5*. Pro použití byly křivky parametrizovány způsobem, který je detailně popsán v *kap. 6.2*.

### 6.1 Redukce únavového zatížení

Z dostupných údajů bylo stanoveno reálné zatížení konstrukce a účinky tohoto zatížení na reálnou konstrukci. Následně byly obdobným způsobem stanoveny účinky od zatížení doporučeného dle normy, tj. zatížení dopravou LM 71 včetně součinitelů uvedených v *kap. 5.1*.

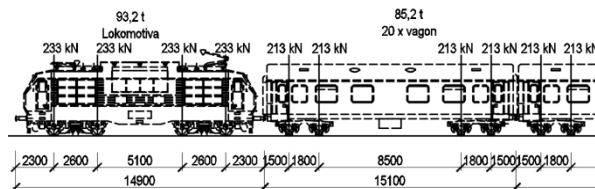
Návrh ekvivalentní vlakové soupravy byl proveden pomocí statistických metod ze skutečných údajů o vlakových soupravách vyskytujících se na uvažované mostní konstrukci. Z tohoto souboru vlakových souprav bylo snahou stanovit charakteristickou ekvivalentní vlakovou soupravu, kterou bude následně možno

využívat pro posuzování betonu na únavu místo dosud využívaného modelu zatížení LM 71. Tvorba ekvivalentní vlakové soupravy byla tvořena pro kvantil odpovídající charakteristické kombinaci, tedy pro kvantil 95 %. Nejprve byl stanoven počet vagonů ekvivalentního vlaku. Následně bylo přistoupeno k výpočtu, kde pomocí statistických metod, jako je průměr, směrodatná odchylka či výpočet požadované hodnoty pro daný kvantil byly stanoveny dvě veličiny. Těmito veličinami jsou síla na jednu nápravu a jednotlivé vzdálenosti mezi nápravami. Tyto vypočtené hodnoty byly následně zaokrouhleny u hmotnosti („síly na nápravu“) na 0,1 t a u vzdáleností na 0,1 m. Tabulka s jednotlivými parametry je zobrazena v *Tab. 1*. Na *obr. 6* je pak vzhled ekvivalentní vlakové soupravy, která má jednu lokomotivu a 20 vagonů.

Další možností, jak zpřesnit hodnoty únavového zatížení pro výpočet, by mohlo být nalezení zpřesněné hodnoty součinitele k přenásobení LM71 pro únavové posouzení. Pro definitivní návrh ekvivalentní vlakové soupravy a/nebo součinitele pro přenásobení LM71 bude nutno provést další výpočty a porovnání pro různé konstrukce.

Ekvivalentní vlaková souprava			
Délka vlakové soupravy	316,900	m	
Délka lokomotivy	14,900	m	
Délka jednoho vagonu	15,100	m	
Lokomotiva - 1 x			
Vzdálenost od nárazníku k nápravě podvozku	Hmotnost na 1 nápravu (t)	Vzdálenost mezi nápravami jednoho podvozku (m)	Vzdálenost mezi poslední nápr. 1. podv. a první nápr. 2. podvozku (m)
2,300	23,300	2,600	5,100
Vagon - 20 x			
Vzdálenost od nárazníku k nápravě podvozku	Hmotnost na 1 nápravu (t)	Vzdálenost mezi nápravami jednoho podvozku (m)	Vzdálenost mezi poslední nápr. 1. podv. a první nápr. 2. podvozku (m)
1,500	21,300	1,800	8,500

Tabulka 1: Přehled jednotlivých parametrů navržené ekvivalentní vlakové soupravy pro posuzování betonu na únavu (navrženo pro most přes Chodovskou ulici)



Obrázek 6: Grafické znázornění části ekvivalentní vlakové soupravy

### 6.2 Přímé využití Wöhlerových křivek

Druhým doporučením je návrh zpřesněného přístupu k posuzování betonu na únavu pomocí přímého využití reálných Wöhlerových křivek popsaných v *kap. 5*. Základem tohoto doporučení je předpoklad přesnosti Wöhlerových křivek, které jsou stanoveny na

základě experimentálních zkoušek množstvím autorů zabývajících se únavovou odolností betonových konstrukcí. V prvním kroku byly převzaty tyto Wöhlerovy křivky z dostupných publikací a z tohoto množství křivek byl vytvořen jeden graf Wöhlerových křivek, které respektují všechny shromážděné křivky, čímž byla zaručena maximální možná přesnost. K tomu byla použita numerická parametrizace – z publikovaných křivek byly metodou nejmenších čtverců stanoveny křivky určené pro posuzování – viz *kap. 5.1 a obr. 3*. Následně byly pro jednotlivé křivky vygenerovány jejich funkce, které jsou rovněž v tomto grafu. Jedná se o polynomické funkce druhého stupně. Poté byl pro jednotlivé koeficienty křivek  $E_{cd,min}$  nalezen vztah opět podle metody nejmenších čtverců. Jedná se o celkem tři koeficienty – polynomický, lineární a konstantní. Po nalezení požadovaných křivek pro tyto koeficienty byl sestaven postup pro posuzování betonu na únavu pomocí numericky parametrizovaných Wöhlerových křivek.

Při využití tohoto postupu je nejprve nutné stanovit hodnoty pro  $E_{cd,max}$  a  $E_{cd,min}$ . Následně z křivek pro jednotlivé koeficienty lze odečíst hodnoty jednotlivých koeficientů pro další výpočet. V tuto chvíli provedeme výpočet posledního koeficientu  $D$  dle *rovnice 1*. Následně dle *rovnice 2* stanovíme exponent  $N$  pro výpočet počtu cyklů napětí potřebného pro dosažení únavové odolnosti betonové konstrukce.

$$D = C - E_{cd,max} \quad (1)$$

$$N = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4 \cdot A \cdot D}}{2 \cdot A} \quad (2)$$

Po stanovení exponentu  $N$  jej dosadíme do vztahu  $10^N$  a dostaneme počet cyklů napětí při dané horní a dolní úrovni napětí, který je potřebný pro dosažení únavové odolnosti betonové konstrukce.

Pro definitivní znění doporučení bude i v tomto případě nutno provést ještě řadu výpočtů pro různé typy konstrukcí a jejich zatížení pro stanovení konečné podoby tohoto doporučení.

## 7. ZÁVĚR

Výsledkem provedeného výzkumu únavové odolnosti betonu a posuzování betonu na únavu jsou dvě doporučení pro úpravu stávajících postupů pro posuzování betonu na únavu – redukce únavového zatížení ve výpočtu a zpřesnění únavové odolnosti betonu. Obě doporučení jsou založena na výsledcích popsání výzkumu. První doporučení je zaměřeno na redukci únavového zatížení betonových konstrukcí - zde je stanovena nová podoba ekvivalentní vlakové soupravy, která by byla využívána při

posouzení betonu na únavu a která lépe vystihuje skutečné únavové zatížení betonových mostních konstrukcí. Tato souprava byla stanovena statistickými metodami na základě skutečného zatížení jednoho konkrétního mostu vlakovou dopravou. Kromě stanovení ekvivalentní vlakové soupravy bude po provedení dalších výpočtů sledována i druhá možnost redukce únavového zatížení ve výpočtu, a to prostřednictvím návrhu úpravy součinitele pro přenásobení modelu zatížení LM71 při jeho využití pro posouzení betonu na únavu.

Druhé doporučení je zaměřeno na zpřesnění únavové odolnosti betonu – zde je uveden návrh nového přístupu pro posuzování betonu na únavu, který je založen na přímém využití reálných Wöhlerových křivek, které jsou pro tento účel numericky parametrizovány. Výsledkem tohoto postupu je stanovení počtu cyklů do porušení konstrukce v závislosti na maximální a minimální úrovni tlakového napětí.

Z důvodu potřebného zevšeobecnění výsledků bude provedena obdobná analýza i pro řadu dalších mostních konstrukcí a jejich zatížení.

## Zdroje

1. ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí, 2006
2. ČSN EN 1992-2 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 2\_ Betonové mosty – Navrhování a konstrukční zásady, 2007, včetně změn
3. fib, Model Code 2010 for Concrete Structures 2010, 2013. ISBN 978-3-433-60409-0
4. Hansen, M. Determination and assessment of fatigue stresses on concrete bridges, *Structural Concrete*, 21(4), 2020, pp. 1286–1297. doi: 10.1002/suco.201900432
5. KIM, J.-K.; KIM, Y.-Y. Experimental study of the fatigue behavior of high strength concrete. *Cement and Concrete Research*, 1996, 26.10: 1513-1523.
6. MIAO, Y.-Y.; NIU, D.-T.; CHENG, N. Durability of Concrete Under the Combined Action of Carbonization and Fatigue Loading of Vehicles. *Science of Advanced Materials*, 2019, 11.12: 1781-1787.
7. PAYMAN, A., SZYMANSKI, M. *Fatigue in Plain Concrete*, Göteborg, 2006
8. Správa železnic, s.o., *Podklady přejezdů jednotlivých vlakových souprav přes most Chodovská*, 2016
9. Správa železnic, s.o., *Archivní dokumentace mostu Chodovská TU 0206 km 3,007*