



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ

INSTITUTE OF CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES

## SOUDRŽNOST FRP VÝZTUŽE A BETONU

BOND BETWEEN FRP REINFORCEMENT AND CONCRETE

## TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS SUMMARY

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Januš

prof. RNDr. Ing. Petr Štěpánek, CSc., dr. h. c

BRNO 2022

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

beton, výztuž, FRP, kompozit, soudržnost, únava

## **KEYWORDS**

concrete, reinforcement, FRP, composite, bond, fatigue

© Copyright Ondřej Januš 2022  
Všechna práva vyhrazena  
Vysoké učení technické v Brně  
Fakulta stavební  
Ústav betonových a zděných konstrukcí

ISBN 80-214-  
ISSN 1213-4198

## Obsah

Obsah.....	2
1 Úvod .....	5
2 Účel a cíl práce.....	6
3 Experimentální část .....	7
3.1 Monotónní zkoušky soudržnosti .....	7
3.1.1 Pull-out zkoušky.....	8
3.1.2 Nosníkové zkoušky .....	9
3.1.3 Vliv konfigurace testu na maximální napětí v soudržnosti.....	11
3.2 Tahové únavové zkoušky.....	11
3.2.1 Únavové zkoušky „holých“ výztuží .....	11
3.2.2 Únavové zkoušky s vlivem krycí vrstvy betonu .....	13
3.3 Únavové zkoušky soudržnosti .....	13
3.4 Únavové zkoušky FRP vyztužených prvků .....	16
3.4.1 Nosníkové zkoušky .....	16
3.4.2 Odolná nosná konstrukce – zákrytová deska .....	18
4 Numerická simulace zatěžovací zkoušky zákrytových desek .....	21
5 Statistická analýza dat únavových zkoušek .....	22
6 Závěry a doporučení pro praxi.....	23
7 Literatura .....	27
Curriculum Vitae.....	29
Abstrakt .....	30



## 1 Úvod

V leteckém, námořním a automobilovém průmyslu jsou FRP (*fibre reinforced polymer – polymery vyztužené vlákny*) materiály hojně využívány díky velmi dobrému poměru únosnosti ke své váze již po dlouhou dobu. V posledních dekádách ovšem nacházejí kompozitní materiály širší uplatnění i ve stavebnictví. Použití těchto inovativních materiálů při vyztužování betonových konstrukcí však často vyžaduje modifikaci návrhového postupu používaného při vyztužování klasickou ocelovou výztuží.

Jedním ze základních předpokladů návrhu vyztužených betonových konstrukcí je kompatibilita přetvoření mezi betonem a výztuží, která je zajištěna soudržností obou materiálů. Studium soudržnosti kompozitní výztuže s betonem se již zabývalo mnoho autorů. Výsledky experimentů však prokázaly značný vliv mechanicko-fyzikálních vlastností výztuže a zejména povrchové úpravy různých typů FRP výztuží na výsledné chování výztuží v soudržnosti. V současné době neexistují žádná normativní doporučení pro povrchové vlastnosti kompozitních výztuží a při dnešním velkém množství různých povrchových úprav není možné bez výsledků skutečných testů soudržnosti přesně stanovit požadovanou kotevní délku výztuže v betonu. Dalším faktorem ovlivňujícím kotevní délku je i tloušťka betonové krycí vrstvy výztuže, která je u výztuží s malým krytím často rozhodující. Krycí vrstvu této nekovové výztuže je možné snížit díky jejím nekorozním vlastnostem a odolností proti působení agresivního prostředí a tím výrazně ušetřit materiál, zabezpečeno však musí být spolehlivé zakotvení prutů umístěných blízko povrchu. Při použití kompozitní výztuže v prvcích vystavených opakovanému zatěžování není doposud detailně popsáno její únavové chování, a především vliv únavového zatížení na spolehlivost kontaktu mezi FRP výztuží a betonem.

Disertační práce se věnuje problematice návrhu betonových prvků vyztužených moderní kompozitní FRP výztuží vystavených působení vysoko-cyklického (únavového) zatížení. Z důvodu rozdílných mechanicko-fyzikálních vlastností a povrchových úprav prutů nejen oproti ocelové výztuží, ale i mezi jednotlivými typy FRP výztuží, je v první řadě nezbytné provedení značného počtu experimentálních testů pro všechny použité typy FRP výztuží. Zvolena byla nejběžněji používaná GFRP výztuž se skleněnými vlákny od dvou různých výrobců (GFRP pruty se liší materiálovým složením, mechanicko-fyzikálními charakteristikami i druhem použité povrchové úpravy). Na těchto GFRP výztužích byly nejprve provedeny základní testy pro stanovení krátkodobých mechanických charakteristik a jednoduché pull-out testy pro stanovení soudržnosti výztuže a betonu. Pruty byly následně podrobeny tahovým únavovým zkouškám a také únavovým zkouškám soudržnosti. Provedené experimenty byly průběžně vyhodnocovány a byly použity dostupné modely pro popis chování FRP výztuží v soudržnosti, modely pro statistické vyhodnocení únavových zkoušek FRP prutů a model pro predikci únavové životnosti prvků vystavených únavovému zatížení se vzrůstající amplitudou. Na základě vyhodnocení dílčích částí byly stanoveny limitní hodnoty zatížení pro bezpečný a spolehlivý návrh vyztužených betonových prvků vystavených únavovému zatížení. Tyto závěry byly následně ověřeny pomocí testování jednoduchých konstrukčních elementů a následně také full-scale testováním vyztužených betonových prvků. Únavové testování konstrukčních prvků prokázalo výhodné únavové vlastnosti použité GFRP výztuže.

## 2 Účel a cíl práce

Problematika únavového chování FRP prutů a kontaktu mezi FRP výztuží a betonem je ve světové literatuře řešena jen okrajově, především z důvodu časově, finančně a technologicky náročných experimentů. Vysoký potenciál kompozitních výztuží je však možné využít až po dokonalém pochopení a popsání jejich dlouhodobých vlastností, které jsou z hlediska spolehlivého návrhu konstrukce klíčové. Jelikož jsou betonové konstrukce často vystaveny opakovanému zatížení, je nutné zabývat se při návrhu těchto konstrukcí i posudkem na únavu. Především doposud není dostatečně popsáno chování FRP výztuže při vysoko-cyklickém zatížení, a to jak samotného prutu, tak jeho soudržnosti s betonem. Pomocí dosud provedených experimentů bylo zjištěno, že i při relativně malých posunech v kontaktu výztuže a betonu během cyklického zatěžování dochází k narušení povrchové úpravy a vnější vrstvy matrice od ostrých hran kameniva betonu. Cyklické zatížení tak může v kombinaci se zásaditým prostředím betonu a dotvarováním výztuže značně ovlivnit celkovou spolehlivost konstrukce.

Cílem disertační práce byl tedy detailní popis chování FRP výztuží a kontaktu FRP výztuže s betonem nejen při monotónním, ale především při únavovém zatěžování. Soudržnost s betonem byla stanovena pro dva základní typy GFRP výztuže s různými povrchovými úpravami, tj. pro opískované a žebírkové GFRP pruty (od dvou různých výrobců). Pro oba typy kompozitní výztuže byly provedeny únavové testy, které určily vliv opakovaného zatěžování na mechanické vlastnosti FRP výztuže a na soudržnost výztuže s betonem. Byly sestaveny S-N křivky vyjadřující únavovou životnost FRP výztuže a její soudržnosti s betonem. Pozornost byla věnována mechanismu porušení výztuže a kontaktu výztuže s betonem po provedení únavových testů v makroskopickém i mikroskopickém měřítku. Byly použity matematické modely pro predikci únavové životnosti prvků vyztužených FRP výztuží se zohledněním požadované úrovně bezpečnosti návrhu.

Účelem práce bylo vytvořit ve světě zcela unikátní soubor dat, které výrazně rozšíří dostupné výsledky v oblasti soudržnosti FRP výztuže s betonem a také v oblasti únavového chování FRP výztuží a napomůže tak implementaci FRP výztuže do směrnic a norem pro návrh vyztužených betonových konstrukcí. Provedeny byly jak dílčí testy v oblasti únavově zatížených prvků, tak i komplexní únavové testy betonových prvků vyztužených FRP výztuží, na kterých byly ověřeny stanovené předpoklady.

### 3 Experimentální část

Za základní typ testované FRP výztuže byly zvoleny opískované pruty se skleněnými vlákny od výrobce etablovaného v ČR – PREFA KOMPOZITY, a.s. Testovaná GFRP výztuž se skládá z E-CR vláken a epoxidové matrice. Povrchová úprava testované výztuže byla provedena za použití křemičitého písku společně s nylonovým vinutím (ozn. vzorků „N“) případně s Kevlarovým vinutím (ozn. „K“). Značení vzorků opískovaných prutů je provedeno následujícím způsobem: GFRP.E.EP.'typ použitého ovinu'.nominální průměr v mm'. U vzorků s nylonovým vinutím byly testovány čtyři různé šarže výrobků (doplněno označení čísly I až IV<sup>1</sup>). Dále byla pro možnost srovnání použita GFRP výztuž s vyfrézovanými žebírky. Jedná se o výztuž pod obchodním názvem ComBAR od výrobce Shöck s celoevropskou působností. Vzhledem k dostupnému sortimentu byla zvolena výztuž s nominálním průměrem 12 mm (ozn. vzorků GFRP.E.VE.R.12). Jsou tak použity dva typy GFRP výztuže s rozdílnými mechanickými vlastnostmi a zcela odlišnými povrchovými úpravami.

Tab. 1 Použité GFRP pruty

Pruty	Výrobce	Druh vlákn	Druh matrice	Povrchová úprava
GFRP.E.EP.K.14	PREFA KOMPOZITY, a.s.	E-CR	EP	opískování + Kevlarové vinutí
GFRP.E.EP.I.N.14		E-CR	EP	opískování + nylonové vinutí
GFRP.E.EP.II.N.10		E-CR	EP	opískování + nylonové vinutí
GFRP.E.EP.II.N.14		E-CR	EP	opískování + nylonové vinutí
GFRP.E.EP.III.N.10		E-CR	EP	opískování + nylonové vinutí
GFRP.E.EP.III.N.14		E-CR	EP	opískování + nylonové vinutí
GFRP.E.EP.IV.N.18		E-CR	EP	opískování + nylonové vinutí
GFRP.E.VE.R.12	Schöck	E-CR	VE	vyfrézovaná žebírka

*E-CR (vlákna z E-CR skla), EP (epoxidová matrice), VE (vinyl-esterová matrice), N (nylonový ovin), K (Kevlarový ovin), R (žebírková výztuž = 'ribbed')*

V práci bylo použito celkově 8 sad GFRP prutů, pro které byly stanoveny základní mechanicko-fyzikální charakteristiky. Klíčové bylo stanovit především tahovou pevnost a modul pružnosti v podélném směru prutu. Dále byly provedeny zkoušky podélné (interlaminární) smykové pevnosti, které jsou v současné době hojně využívány pro stanovení vlivu degradačního prostředí na pevnost kontaktu mezi matricí a vlákny a také slouží jako kvalitativní zkouška při výstupní kontrole. Tento test je v disertační práci určen pro stanovení vlivu únavového zatížení na porušení kontaktu matrice s vlákny.

#### 3.1 Monotónní zkoušky soudržnosti

Pro všechny typy zkoušek soudržnosti (pull-out/nosníkové zkoušky) bylo použito shodné složení betonové směsi. V případě nosníkových zkoušek soudržnosti byla sledovaným parametrem zkoušky také tlaková pevnost betonu. Rozdílné tlakové pevnosti betonu bylo dosaženo změnou vodního součinitele betonu. Maximální frakce kameniva 11 mm byla zvolena z důvodu

<sup>1</sup> Výztuž vyvíjena v rámci projektu Technologické agentury ČR TH03020067 „FRP výztuž se zvýšenou spolehlivostí a trvanlivostí při vysoko-cyklickém zatížení“.

dokonalého ztuhnutí betonu hustě vyztužených nosníků ocelovou výztuží. Z tohoto důvodu byla také zvolena konzistence betonové směsi S5 (sednutí kužele cca 220 mm).

### 3.1.1 Pull-out zkoušky

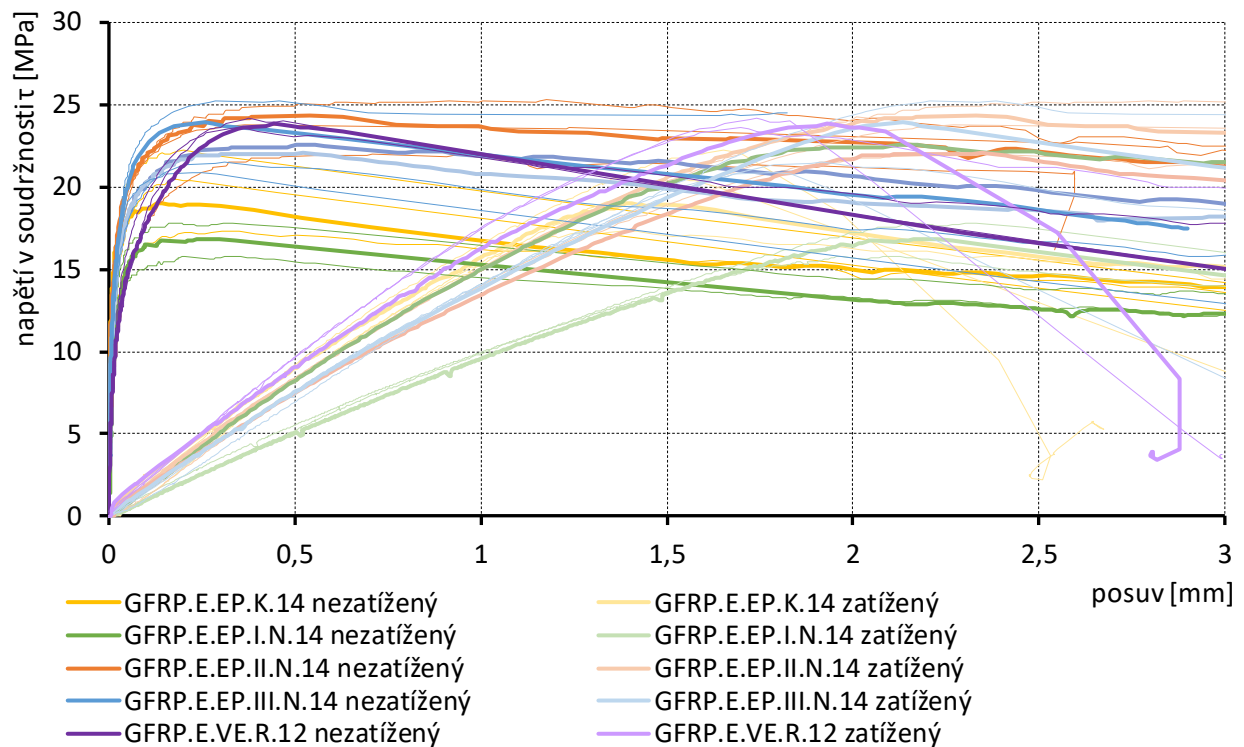
Experimentální program se skládal ze základních (centrických) pull-out testů a také modifikovaných (excentrických) pull-out testů. Excentrické uložení prutů v blízkosti okraje betonové krychle simulovalo obvyklou pozici výztuže v reálných konstrukcích. Centrické pull-out testy byly provedeny dle ACI 440.3R [1]. Pruty byly zabetonovány v krychli o hraně 200 mm. Délka, na níž je zajištěna soudržnost s betonem, byla pětinasobek průměru prutu, zbývající část byla separována pomocí pěnového polyethylenu. Betonáž vzorků probíhala ve svislé poloze, přičemž bylo dbáno na dobré ztuhnutí s využitím vibračního stolu.

Relativní posun výztuže v kotevní oblasti vůči betonové krychli během zkoušky byl měřen indukčnostními snímači dráhy. U centrických pull-out testů zaznamenávaly dva snímače posun zatíženého konce a jeden pak posun nezatíženého konce prutu. V případě excentrických pull-out testů bylo krytí výztuže rovno průměru prutu (vzorek neobsahoval žádnou příčnou výztuž) a sledovaná kotevní délka byla shodná s centrickými pull-out testy. Pomocí indukčnostních snímačů byl zaznamenáván pouze posun nezatíženého konce výztuže. Měření zatíženého konce výztuže nebylo vzhledem k použité konfiguraci testu možno provádět s požadovanou přesností.

Pomocí centrických pull-out zkoušek byl testován vliv povrchové úpravy na soudržnost GFRP prutů. Testovány byly čtyři různé šarže opískovaných prutů (GFRP.E.EP.K.14, GFRP.E.EP.I.N.14, GFRP.E.EP.II.N.14, GFRP.E.EP.III.N.14) a také pruty s povrchovou pravou tvořenou vyfrézovanými žebírky (GFRP.E.VE.R.12). V průběhu experimentu byl potvrzen závěr studie [2]. Dochází-li k porušení soudržnosti na styku jádra a povrchové úpravy a okolní beton zůstává neporušen (v případě oddělení opískování od jádra prutu), není vhodné popisovat sestupnou větev na základě průběhu závislosti posuvu nezatíženého konce na napětí v soudržnosti. Při posuvu výztuže se do oblasti soudržnosti postupně posouvá část výztuže s neporušenou povrchovou úpravou a tím zvyšuje (nahodnocuje) zbytkovou soudržnost. Maximální napětí v soudržnosti  $\tau_{max}$  bylo stanoveno s uvážením konstantního rozdělení napětí po délce se zajištěnou soudržností.

Maximální napětí v soudržnosti opískovaných prutů s nylonovým ovinem (GFRP.E.EP.II.N.14 a GFRP.E.EP.III.N.14) dosahuje přibližně 23 MPa, což je hodnota srovnatelná s testovanými žebírkovými pruty GFRP.E.VE.R.12. U vzorků GFRP.E.EP.I.N.14 s nylonovým ovinem se ovšem projevila nízká kvalita opískování, což zapříčinilo výrazné snížení napětí v soudržnosti při porušení a také nárůst rozdílu mezi posuvem zatíženého a nezatíženého konce. Opískované pruty s Kevlarovým vinutím vykazují nepatrně nižší maximální napětí v soudržnosti – přibližně 20 MPa. Maximálního napětí v soudržnosti je dále dosaženo při nižším posuvu výztuže v kotevní oblasti, což značí křehčí chování v porovnání s opískovanými pruty s nylonovým vinutím. U vzorků GFRP.E.EP.II.N.14 bylo dosaženo maximálního napětí v soudržnosti při výrazně vyšším posuvu nezatíženého konce výztuže než u ostatních testovaných sad. To je patrně způsobeno menším vytvrzením matrice při výrobě, a tedy měkčím povrchem výztuže.





Obr. 1 Závislost posuvu zatíženého a nezatíženého konce výztuže na napětí v soudržnosti (centrický pull-out)

V případě excentrického pull-out testu vznikala při zatěžování v místě se zajištěnou soudržností podélná trhlinka na povrchu betonové krychle. Radiální napětí v okolí prutu tedy překonalo tahovou pevnost betonu. Porušení vzorku obvykle nastalo vytržením prutu při plošném porušení krycí vrstvy. U prutů umístěných v blízkosti okraje docházelo nejen ke snížení maximálního napětí v soudržnosti (v porovnání s centricky umístěným prutem), ale také bylo dosaženo maximálního napětí v soudržnosti při menším posuvu výztuže.

Testované opískované pruty dosáhly maximálního napětí v soudržnosti 14–15 MPa, zatímco u žebírkových prutů došlo k porušení krycí vrstvy při hodnotě přibližně 12 MPa. Nižší hodnota napětí v soudržnosti při porušení u žebírkových prutů lze zdůvodnit vyšším radiálním napětím v případě kotvení žebírkových prutů. Tento jev byl pozorován také ve studii [3].

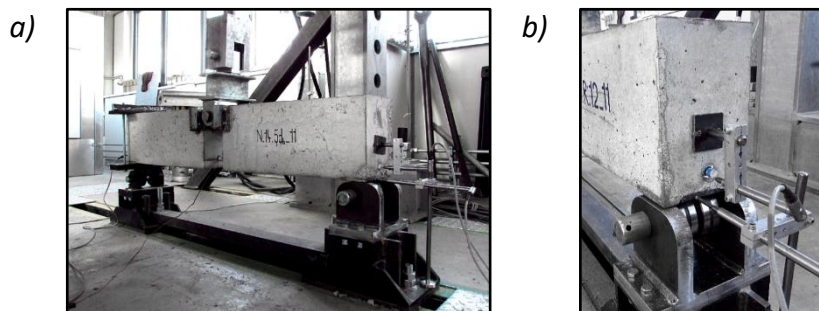
### 3.1.2 Nosníkové zkoušky

Upravená nosníková zkouška soudržnosti vycházela z konfigurace nosníkové zkoušky soudržnosti ocelové výztuže dle RILEM FIP-CEB [4], přičemž byla zachována většina doporučených rozměrů. Byly však provedeny úpravy s ohledem na specifika GFRP výztuží a také pro umožnění případného cyklického zatěžování ve shodné konfiguraci testu. Kotevní délka prutu byla z důvodu nižšího modulu pružnosti testovaných GFRP výztuží oproti oceli zmenšena z desetinásobku průměru výztuže na pětinašobek. Při této kotevní délce lze předpokládat, že je možné uvažovat u GFRP výztuže rovnoměrné rozdělení napětí v soudržnosti (viz např. [5]). Dále je upraven ocelový kloub, který je pevně kotven k jednotlivým segmentům nosníku, přičemž zatížení je vnášeno přímo na čep kloubu.

## TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

### Soudržnost FRP výztuže a betonu

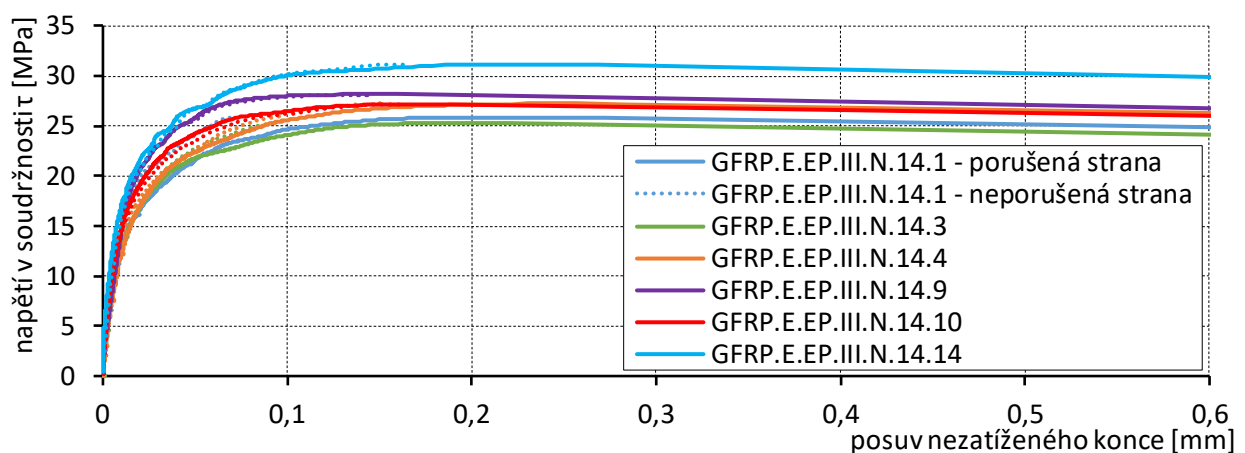
Pro testování soudržnosti pomocí nosíkové zkoušky byly zvoleny opískované pruty GFRP.E.EP.III.N.14 a žebírkové pruty GFRP.E.VE.R.12. Vzhledem k novosti navrženého řešení bylo cílem vytvořit dostatečně robustní sadu dat. Celkově bylo provedeno 12 monotónních zkoušek soudržnosti. V průběhu zatěžování bylo sledováno chování nosníků, především volná deformace v místě posuvné podpory a funkčnost středového kloubu. V průběhu zkoušky bylo indukčností snímači zaznamenáváno vodorovné přemístění posuvné podpory a posuv nezatížených konců v kotevní oblasti. Měření posuvu v bezprostřední blízkosti zatíženého konce soudržnosti nebylo přímo realizováno. Pro zajištění čtení skutečné působící síly ve výztuži byl uprostřed volné délky výztuže osazen odporový tenzometr.



Obr. 2 Reálné provedení zkoušky: a) nosník uložený na podporách; b) měření posuvu nezatíženého konce výztuže a vodorovného posuvu v místě posuvné podpory

Nosíkové vzorky byly silově zatěžovány rychlostí 0,25 kN/s až do porušení vzorku. V případě nosíkové zkoušky bylo porušení krycí vrstvy bráněno hustě rozmístěnou příčnou výztuží. Při této konfiguraci zkoušky u žádného ze vzorků nedošlo k roztržení krycí vrstvy betonu a porušení bylo způsobeno vytažením výztuže na jedné straně nosníku.

Na Obr. 3 jsou graficky vyneseny výsledky nosíkových zkoušek soudržnosti opískovaných prutů GFRP.E.EP.III.N.14 ve formě závislosti posuvu nezatíženého konce výztuže na napětí v soudržnosti pro porušenou (plnou čarou) i neporušenou (tečkovaně) oblast soudržnosti.



Obr. 3 Posuv nezatíženého konce výztuže v závislosti na napětí v soudržnosti při nosíkové zkoušce prutů GFRP.E.EP.III.N.14

V případě nosíkových zkoušek prutů GFRP.E.EP.III.N.14 byl po rozřezání vzorků vyzorován mírně odlišný způsob porušení než u centrických pull-out testů. Při zatěžování byla u některých vzorků viditelná podélná trhlinka ve směru rovnoběžném se spodním povrchem vzorku v blízkosti

kotevní oblasti. Tato podélná trhлина byla způsobena radiálním napětím okolo kotevní oblasti. K porušení kontaktu docházelo dvěma různými způsoby v závislosti na tlakové pevnosti betonu. V případě vzorků se střední tlakovou pevností betonu přibližně 32 MPa docházelo ke kombinovanému smykovému porušení betonu a oddělení opískování od jádra průřezu. U vzorků s tlakovou pevností cca 55 MPa bylo porušení způsobené oddělením opískování od jádra průřezu téměř na celé oblasti soudržnosti.

U žebírkových prutů GFRP.E.VE.R.12 docházelo v případě nosníkové zkoušky k obdobnému porušení soudržnosti jako v případě centrického pull-out testu a to smykovým porušením betonu v úrovni žebírek. Pouze na několika místech bylo pozorováno porušení povrchu prutu od ostrých hran kameniva betonu. U vzorků s tlakovou pevností betonu vyšší než 60 MPa byl pozorován mírně odlišný mechanismus porušení. V blízkosti líce betonového prvku docházelo (shodně s pull-out testy) ke smykovému porušení betonu, ovšem na horní straně výztuže orientované dále od krycí vrstvy došlo k oddělení několika žebírek. Při zatěžování (při deformaci nosníku) je horní strana výztuže přitlačena k betonu, což má za následek popsané porušení žebírek na horní straně prutu.

### **3.1.3 Vliv konfigurace testu na maximální napětí v soudržnosti**

Bylo experimentálně prokázáno, že konfigurace testu soudržnosti má výrazný vliv na dosažené hodnoty mezního napětí v soudržnosti a také na mechanismus porušení soudržnosti. Porovnání bylo provedeno pro vzorky opískované výztuže GFRP.E.EP.III.N.14 a žebírkové výztuže GFRP.E.VE.R.12, u kterých byly provedeny testy pomocí všech tří zvolených konfigurací (centrický/excentrický pull-out a nosníková zkouška. Pomocí provedených experimentů bylo zjištěno, že tloušťka betonové krycí vrstvy má významný vliv na chování opískované GFRP výztuže v soudržnosti. Při tloušťce krycí vrstvy rovnající se jednonásobku průměru prutu dochází k výraznému snížení (přibližně o 40 %) maximálního napětí v soudržnosti a odpovídajícího posuvu výztuže. V případě nosníkové zkoušky je maximální napětí v soudržnosti přibližně o 15 % vyšší než u centrického pull-out testu, zatímco posuv nezatíženého konce výztuže je o 25 % nižší. Centrické pull-out testy tedy vykazují vyšší duktilitu kontaktu.

Maximální napětí v soudržnosti při nosníkové zkoušce žebírkové výztuže GFRP.E.VE.R.12 je výrazně nižší než maximální smykové napětí určené pomocí pull-out. Kromě nejvyššího dosaženého napětí v soudržnosti byla tato hodnota u centrické pull-out zkoušky dosažena při výrazně vyšším posuvu výztuže v kotevní oblasti. Nízké maximální napětí v soudržnosti během nosníkové zkoušky je však zřejmě způsobeno velkým množstvím pórů v betonu v kotevní oblasti, které mělo za následek výrazné snížení smykové únosnosti betonu. Maximální smykové napětí při excentrickém pull-out testu bylo dle očekávání nejnižší.

## **3.2 Tahové únavové zkoušky**

### **3.2.1 Únavové zkoušky „holých“ výztuží**

Vliv působícího únavového zatížení na spolehlivost FRP výztuže lze nejjednodušeji (s ohledem na náročnost instrumentace a přípravu vzorků) testovat na vzorcích v konfiguraci obdobné s monotónní tahovou zkouškou (ukotvení vzorku zajišťují ocelové koncovky upnuté do čelistí

zkušebního zařízení). Tuto konfiguraci umožňují využít např. směrnice ACI 440.3R-12 [1] nebo normy ISO 10406-1:2015 [6] a CSA S806-12 [7], kdy testy únavy v nich popsané vycházejí vždy z provedení monotónních tahových zkoušek.

Parametry provedených únavových zkoušek byly voleny dle směrnice ACI 440.3R [1]. Vzorky byly silově zatěžovány kmity s tvarem sinusoidy. Dle [1] je přípustné rozmezí frekvence zatěžování 1-10 Hz, přičemž doporučená hodnota je 4 Hz. Pro sestavení S-N křivek byl využit postup c) dle [1], kdy: parametr asymetrie (podíl minimálního a maximálního napětí v cyklu) je pro všechny úrovně roven 0,1 ( $R=0,1$ ) a upravena je vždy maximální (a díky tomu i minimální) hodnota zatížení v cyklu. Vzorky byly zatěžovány do porušení nebo do dosažení únavové životnosti  $2,5 \times 10^6$  cyklů.

Použitá konfigurace zkoušky se ukázala jako náchylná na přesnost osazení vzorku v kotevní koncovce a také v čelistech zkušebního zařízení. Imperfekce byla do určité míry omezena vložením kloubů do statického schématu, které jsou při zkoušce vzájemně pootočený o  $90^\circ$ . Avšak ani při této úpravě zkušební sestavy nebylo u nižších testovaných hladin zatížení zajištěno porušení v požadovaném místě vzorku, tj. v jeho volné délce. U vzorků na hladinách maximálního napětí v cyklu rovnající se 60 % a 50 % tahové pevnosti výztuže docházelo k požadovanému způsobu porušení. U vzorků na hladině 40 % došlo v několika případech k předčasnému porušení v místě kotevní koncovky. Ovlivnění výsledků však lze předpokládat i pro vyšší hladiny zatížení (60 % a 50 %).

Pro omezení koncentrace napětí v horní části koncovky byla použita modifikovaná zálivka s použitím změkčovadla pro zalití FRP prutů do kotevních koncovek. Dvě třetiny vzorků (ze strany nezatěžovaného konce prutu) byly vyplněny standardní zálivkou s vyšší tuhostí, ve zbývající třetině byla použita zálivka s nižší tuhostí. Účelem bylo snížit namáhání v místě počátku kotvení zkušební vzorku, přerozdělit působící napětí dále do těla kotvy a eliminovat tak nežádoucí porušení vzorku v místě vetknutí do koncovky.

Jelikož zahraniční studie (např. [8] a [9]) upozorňují na skutečnost, že volba frekvence zatěžování má významný vliv na výsledné hodnoty mezního počtu cyklů, byl tento vliv na testových prutech s měkkou zálivkou kvantifikován. Pro únavové zkoušky vzorků byla jako základní zvolena frekvence 4 Hz (plně v souladu s doporučením [1]). Stanovení vlivu frekvence zatěžování na únavovou životnost bylo následně provedeno doplněním zkoušek na rychlostech 1 Hz a 10 Hz, které jsou v zahraniční literatuře uváděny jako limitní. Byly tak ověřeny frekvence v celém přípustném rozsahu. Bylo experimentálně ověřeno, že zvýšení frekvence zatěžování na 10 Hz způsobuje výrazné snížení únavové životnosti, zatímco při frekvenci zatěžování menší než 4 Hz již nemá snížení frekvence zatěžování významný vliv na výsledný počet cyklů do porušení.

Při porovnání únavové životnosti získané pro různé způsoby kotvení vzorků při frekvenci 4 Hz došlo k nárůstu počtu cyklů do porušení při použití modifikované změkčené zálivky oproti koncovce s klasickou zálivkou. Avšak u vzorků docházelo k nežádoucímu porušení v jednom řezu na rozhraní tuhosti zálivky uvnitř kotevní koncovky – tj. cca 100 mm uvnitř koncovky. I přes dílčí zlepšení (navýšení počtu cyklů do porušení) se však jedná o nevhodný způsob porušení a výsledky nemohly být zařazeny do vyhodnocení únavové životnosti testované výztuže.

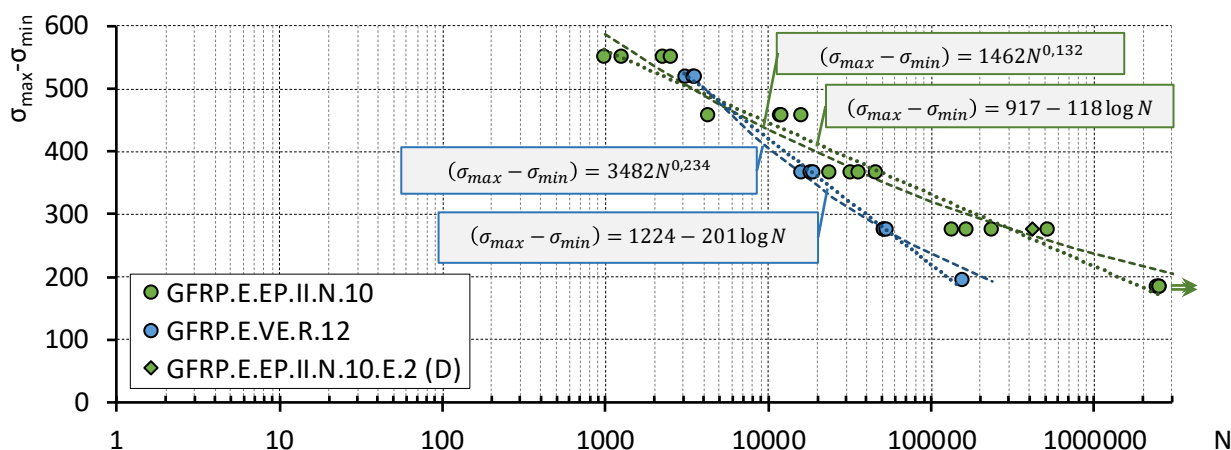
### 3.2.2 Únavové zkoušky s vlivem krycí vrstvy betonu

Únavové zkoušky vzorků GFRP prutů centricky osazených v betonovém segmentu byly navrženy dle postupu uvedeného v [10]. Vzorky výztuží jsou při tomto typu zkoušky osazeny ve vhodně upraveném betonovém tělese, jež simuluje reálné podmínky aplikace FRP výztuží a též zajišťuje bezpečné kotvení v průběhu zkoušky.

Vzorky byly zatěžovány do porušení nebo do dosažení únavové životnosti  $2,5 \times 10^6$  cyklů se stejnými parametry jako únavové zkoušky holých výztuží (kap. 3.2.1), tzn. dle doporučení směrnice [1]. Bylo testováno pět hladin působícího únavového zatížení na vzorcích GFRP.E.EP.II.N.10. Hladiny maximálního napětí v cyklu byly voleny jako 20 %, 30, 40 %, 50 % a 60 % pevnosti FRP výztuže v tahu. Dále byly testovány čtyři hladiny zatížení na žebírkových vzorcích GFRP.E.VE.R.12 – maximální hodnota napětí v cyklu se přibližně rovnala 20 %, 30, 40 % a 60 % pevnosti v tahu.

S-N křivky na Obr. 4 jsou vytvořeny na základě vyčíslení rozkmitu zatížení ( $\sigma_{max} - \sigma_{min}$ ). Bylo zjištěno, že v případě porovnání materiálů s výrazně odlišnou tahovou pevností je velmi důležité vhodně zvolit srovnávanou veličinu. Tj. zdali je vyhodnocen poměr  $\sigma_{max}/\sigma_{ult}$  nebo uvážena velikost rozkmitu zatížení. S-N křivky s vneseným poměrem  $\sigma_{max}/\sigma_{ult}$  jsou v literatuře běžnější. Pro pruty s vysokou tahovou pevností (platí pro v experimentu využitě žebírkové pruty GFRP.E.VE.R.12) je však pro stejnou hladinu maximálního zatížení v cyklu  $\sigma_{max}/\sigma_{ult}$  realizován významně vyšší rozkmit zatížení (při uvážení stejného parametru asymetrie).

Z uvedených výsledků je zřejmé, že logaritmus únavové životnosti roste lineárně se snižováním působícího napětí. V testovaném rozsahu se aproximace s využitím logaritmické a mocninné funkce výrazně neliší. Je však zřejmé, že při použití mocninné funkce není vhodné extrapolovat data pro oblast nízko-cyklické únavy.



Obr. 4 Závislost počtu cyklů do porušení na rozkmitu zatížení testovaných prutů

### 3.3 Únavové zkoušky soudržnosti

S ohledem na výsledky referenčních vzorků podrobených monotónnímu zatěžování (kapitola 3.1) byly únavové testy soudržnosti realizovány v konfiguraci nosíkové zkoušky, přičemž základní konfigurace zůstala zachována shodně s monotónní zkouškou (viz Obr. 2). S ohledem na povahu zkoušky (dlouhodobě působící cyklické zatížení) se jako zcela zásadní ukázala nutnost dodržet

okrajové podmínky v průběhu celého jejího trvání, především zajištění volné vodorovné deformace v místě posuvné podpory i při působení opakujícího se zatížení o vysoké intenzitě. To bylo zabezpečeno použitím dvojice soudečkových ložisek na hřídeli (Obr. 2b), které umožnily náklon i v příčném směru a tím eliminovaly drobné nepřesnosti povrchu při betonáži nosníků. Funkčnost řešení, tj. zajištění volné vodorovné deformace v místě posuvné podpory, byla shodně s monotónní zkouškou sledována pomocí odporového tenzometru osazeného uprostřed volné délky testované GFRP výztuže. Případná redukce přetvoření výztuže během zatěžování (tj. snížení tahové síly ve výztuži) by indikovala zvýšené tření v místě posuvné podpory (případně v místě středového kloubu), a tedy i nežádoucí změnu statického schématu. Funkčnost posuvné podpory byla dále ověřena sledováním vodorovné deformace konce nosníku nad posuvnou podporou. Případná redukce vodorovného posunu při zatěžování by taktéž znamenala zvýšené tření v místě posuvné podpory. Frekvence zatěžování byla z důvodu očekávaných velkých svislých posunů nosníku uprostřed rozpětí a s přihlédnutím k technickým možnostem lisu nastavena na 2 Hz. Při této rychlosti bylo možné na prvky aplikovat zatížení ve tvaru sinusoidy. Testy byly realizovány při uvážení doporučeného parametru asymetrie 0,1, přičemž jako proměnná mezi jednotlivými vzorky byla uvážena změna hladiny maximálního, a tudíž i minimálního, napětí v soudržnosti v cyklu. Hladiny testovaného únavového zatížení vycházely z maximálního dosaženého napětí v soudržnosti při nosníkové zkoušce s monotónně aplikovaným zatížením. Celkem bylo úspěšně provedeno 10 únavových nosníkových zkoušek soudržnosti. K vyčerpání únavové životnosti nosníku docházelo porušením kontaktu mezi výztuží a betonem nebo porušením samotného prutu.

U vzorků GFRP.E.EP.III.N.14 s povrchovou úpravou tvořenou opískováním byl vyzorován obdobný mechanismus porušení soudržnosti jako v případě monotónní zkoušky, viz kap. 3.1.2. Porušení soudržnosti bylo způsobeno kombinací oddělení opískování od jádra průřezu a smykového porušení betonu. U vzorků na vyšších hladinách zatížení (s menším počtem cyklů do porušení) bylo pozorováno výrazné smykové porušení betonu, zatímco u vzorku s větším počtem cyklů do porušení bylo porušení z větší části způsobené oddělením opískování.

Při únavových zkouškách soudržnosti žebírkových prutů GFRP.E.VE.R.12 došlo ve třech případech k porušení soudržnosti, zatímco u dvou vzorků bylo porušení vzorku způsobeno přetržením výztuže. Při porušení soudržnosti docházelo ke smykovému porušení betonu v úrovni žebírek. Povrch výztuže zůstal neporušený až na několik lokálních porušení žebírek od ostrých hran kameniva. K únavovému porušení prutů docházelo při dostatečně nízké úrovni zatížení a tudíž při značném provedeném počtu cyklů. Porušení prutů nastalo na volné délce uprostřed nosníku mezi oblastmi soudržnosti. Po rozřezání vzorku nebylo okem pozorovatelné porušení betonu nebo povrchu výztuže.

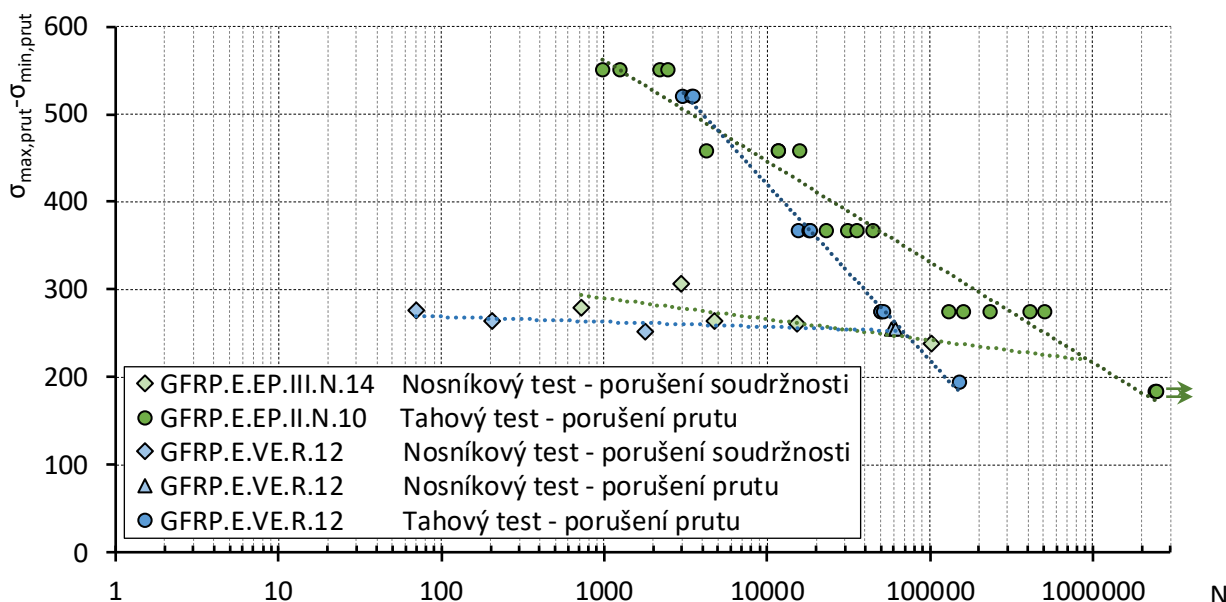
Bylo prokázáno, že logaritmus únavové životnosti roste lineárně se snižováním napětí v soudržnosti. Proložení bodů únavového porušení bylo provedeno metodou nejmenších čtverců. Výslednou závislost napětí v soudržnosti na počtu cyklů do porušení lze pro opískované pruty vyjádřit dle vztahu ((3.1); pro žebírkové pruty dle vztahu (3.2)).

$$\tau_{b,max}/\tau_{b,ult} = 0,840 - 0,077 \log N \quad (3.1)$$

$$\tau_{b,max}/\tau_{b,ult} = 0,790 - 0,042 \log N \quad (3.2)$$

Je zřejmé, že povrchová úprava výztuže ovlivňuje chování v soudržnosti (a s tím související mezní úroveň napětí v soudržnosti) při únavovém zatěžování. U opískovaného povrchu je dosahováno vyššího napětí v soudržnosti při monotónní zkoušce, avšak maximální napětí v soudržnosti (ve srovnání s povrchovou úpravou žebírky) rychleji klesá s narůstajícím počtem cyklů. Toto chování souvisí pravděpodobně se způsobem porušení kontaktu. Závěr je však platný pouze pro testované vzorky a krátké kotevní délky. Výsledky z únavových zkoušek soudržnosti jsou vyneseny na Obr. 5. Pro potřeby porovnání s únavovou životností samotných prutů (kap. 3.2.2) je na svislou osu grafů místo napětí v soudržnosti vynášen rozkmit napětí ve výztuži.

Bylo experimentálně prokázáno, že kotvení prutů významně ovlivňuje přípustnou hladinu únavového zatížení. Aby nedocházelo k únavovému porušení, neměla by pro testované opískované pruty maximální hodnota napětí na prutu v cyklu přesáhnout 35% tahové pevnosti výztuže. Obdobně pro žebírkové pruty GFRP.E.VE.R.12 je maximální hodnota napětí omezena na 20% tahové pevnosti. Vzhledem ke způsobu porušení soudržnosti žebírkových prutů vlivem smykového porušení betonu je však tato hodnota značně závislá na pevnosti použitého betonu. Dále je nutné poznamenat, že jsou výsledky únavové životnosti soudržnosti platné pouze pro velmi krátké kotevní délky (pětinásobek průměru prutu). Při vynesení rozkmitu napětí na prutu na svislou osu grafu je limitní hodnota pro únavové porušení soudržnosti pro opískované pruty přibližně 210 MPa (to odpovídá rozkmitu napětí v soudržnosti přibližně 10,5 MPa) a pro žebírkové pruty cca 250 MPa (rozkmit napětí v soudržnosti cca 12,5 MPa).



Obr. 5 Únavová životnost GFRP prutů a soudržnosti s betonem v závislosti na rozkmitu napětí v prutu

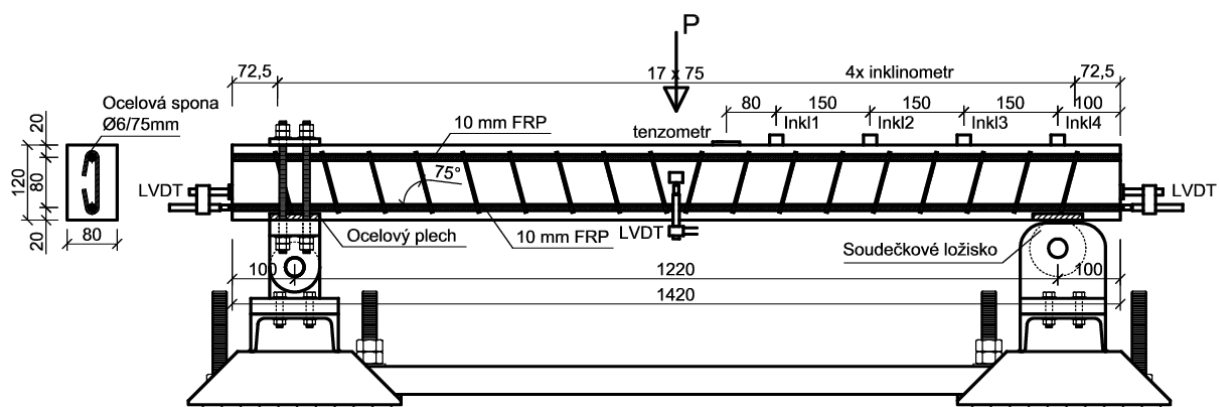
### 3.4 Únavové zkoušky FRP vyztužených prvků

Posledním stupněm experimentálního programu bylo ověření únavového chování celých konstrukčních prvků vystavených únavovému zatěžování. Při návrhu prvků byly zohledněny všechny doposud provedené experimenty, především tahové únavové zkoušky FRP prutů v betonových blocích (kap. 3.2.2) a nosíkové zkoušky soudržnosti při únavovém zatěžování (kap. 3.3). Byly navrženy jednoduché ohýbané nosníky a také komplexní konstrukční prvky ve formě zákrytových desek. Nosíková zkouška byla navržena v konfiguraci třibodového ohybu především pro ověření předpokládané únavové životnosti založené na S-N křivce získané pro dostředně tažené pruty a také pro ověření vhodnosti osazené instrumentace při únavové zkoušce. Tyto poznatky byly dále využity při návrhu zákrytové desky. Pro oba navržené konstrukční prvky byl jeden vzorek určen jako referenční pro stanovení krátkodobé únosnosti. Další vzorky byly určeny pro únavové zkoušky s konstantní i postupně vzrůstající amplitudou zatížení.

#### 3.4.1 Nosíkové zkoušky

Celkem bylo vyrobeno pět vzorků, z nichž jeden byl jako referenční určen pro statickou zkoušku s monotónně aplikovaným zatížením. Další čtyři vzorky byly ve stejné konfiguraci testu zatěžovány cyklicky. Testována byla dvě různá schémata působícího únavového zatížení: a) s konstantní amplitudou zatížení, b) s postupně rostoucí amplitudou. Prvek představoval nosník simulující výřez části zákrytové desky (viz 3.4.2), jehož rozměry i způsob vyztužení byly upraveny s ohledem na možnosti zkušební laboratoře a zajištění opakovatelnosti testu. Výsledné rozměry zkušební vzorku nosníku jsou 80/120/1420 mm (šířka/výška/délka prvku) a jeho vyztužení tvoří jeden prut výztuže typu GFRP o průměru 10 mm při horním a spodním povrchu.

Zatěžovací zkouška byla konfigurována jako třibodový ohyb, u kterého je nezbytné pro účely cyklického zatížení umožnit posun podpory (zabránění volné deformace zapříčiní negativní zkreslení výsledků z důvodu tření v místě podepření). Provedení zkoušky, resp. uspořádání zatěžovacího rámu, vycházelo z úspěšně provedených zkoušek soudržnosti na nosnících se středovým kloubem (viz 3.3), kdy byl pro uložení zkušebních vzorků využit totožný systém – jeden konec je uložen na pevné podpoře a z důvodu zajištění polohy vzorku při cyklickém zatěžování sevrěn, druhý konec je uložen na posuvné podpoře tvořené soudečkovým ložiskem.



Obr. 6 Schéma nosíkové únavové zkoušky



### **Referenční monotónně zatěžovaný nosník**

Pro výstižný popis chování zkušebních vzorků a současně pro ověření vhodnosti použitých typů snímačů a jejich rozmístění byl referenční vzorek (ozn. GFRP.E.EP.IV.N\_1) osazen v plné konfiguraci. Kromě zaznamenávání velikosti tlakové síly a posunu zatěžovacího válce bylo navrženo monitorování průhybu uprostřed rozpětí (v místě vnášení síly) pomocí indukčního snímače dráhy, měření změny náklonu pomocí čtveřice inklinometrů umístěných v definovaných bodech nosníku umožňující popis průhybové čáry, měření přetvoření horního (tlačeného) povrchu betonu pomocí odporového tenzometru a měření posuvů konců tažené výztuže pomocí indukčních snímačů dráhy, které by indikovali případné nežádoucí selhání soudržnosti mezi výztuží a povrchem betonu. Schéma zatěžovací zkoušky včetně rozmístění jednotlivých snímačů je uvedeno na Obr. 6.

Pro zkušební vzorek byla před provedením experimentu stanovena teoretická mezní ohybová únosnost dle [11]. Moment únosnosti byl stanoven s uvážením středních materiálových charakteristik naměřených na reálných vzorcích výztuže i betonu. Teoreticky stanovená mezní ohybová únosnost při statické/jednorázové zatěžovací zkoušce prvku je 5,95 kNm (odpovídající maximální působící síla dle schématu na Obr. 6 je 19,5 kN). Dle výpočtu bylo předpokládáno porušení průřezu způsobené drcením tlačeného betonu. Provedené výpočty byly následně porovnány s výsledky reálného experimentu.

Referenční vzorek byl podroben jednorázovému deformačnímu zatížení rychlostí 5 mm/min až do porušení a sloužil k ověření/nastavení úrovně zatížení při únavovém zatěžování. Na základě porovnání výpočtové a naměřené únosnosti 19,2 kN (rozdíl oproti vypočtené únosnosti 1,5 %) a také predikovaného a skutečného způsobu porušení vyčerpáním tlakové pevnosti betonu, bylo možné definovat spodní a horní úroveň zatížení při cyklické zkoušce.

### **Nosník vystavený únavovému zatížení s konstantní amplitudou**

Po úspěšném provedení monotónní zkoušky nosníku GFRP.E.EP.IV.N\_1 byla navržena únavová zkouška s konstantní amplitudou zatížení. Horní hladina cyklického zatížení vzorku GFRP.E.EP.IV.N\_2 vycházela z krátkodobé tahové únosnosti GFRP výztuže, která byla stanovena hodnotou 20 %<sup>2</sup> a byla nastavena tak, aby došlo k případnému porušení kompozitní výztuže před porušením betonu. Na základě podrobného vyhodnocení monotónně zatěžovaného vzorku GFRP.E.EP.IV.N\_1 bylo možné redukovat počet měřených míst, kdy lze z důvodu dostatečné úrovně kotvení upustit od měření posuvu konců výztuže. V průběhu zatěžování byl pozorován postupný nárůst průhybu uprostřed rozpětí, přetvoření tlačených vláken betonu i náklonu měřených bodů, která indikují míru kumulovaného trvalého poškození vzorku. Kumulace porušení prvku se v průběhu zatěžování postupně ustaluje.

Po provedení  $2 \times 10^6$  cyklů byl vzorek monotónně zatížen až do porušení (provedeno shodně s referenčním vzorkem GFRP.E.EP.IV.N\_1). Výsledná (reziduální) ohybová únosnost vzorku byla 18,9 kN. Rozdíl v únosnosti oproti referenčnímu vzorku, který nebyl vystaven předchozím

---

<sup>2</sup> Hladina zatížení zabezpečující únavovou životnost  $>2 \times 10^6$  cyklů u vzorků namáhaných dostředným tahem, kap. 3.2.2

únavovému zatěžování, byl nevýznamný – pouze 1,6 %. Způsob porušení byl shodný s referenčním vzorkem (tlakové porušení betonu). Rozdíl v dosažených výsledcích je v mezích rozptylu mechanických charakteristik použitých materiálů a nelze tedy usuzovat na negativní ovlivnění únosnosti prvku při působení  $2 \times 10^6$  cyklů na hladině maximálního zatížení v cyklu 20 % tahové pevnosti.

#### **Nosníky vystavené únavovému zatížení s rostoucí amplitudou**

Vzorky GFRP.E.EP.IV.N\_3, GFRP.E.EP.IV.N\_4 a GFRP.E.EP.IV.N\_5 byly podrobeny únavovému zatížení se vzrůstající amplitudou. Výchozí hladina maximálního zatížení byla zvolena 20 % mezní tahové pevnosti GFRP výztuže (tj.  $\sigma_{\max} = 0,2\sigma_{\text{ult}}$ ) a po každých 50 000 cyklech byla zvýšena o 5 %. Minimální hladina zatížení v cyklu byla pro každou hladinu stanovena na 10% maximální hladiny zatížení ( $\sigma_{\min} = 0,1\sigma_{\max}$ ;  $R = 0,1$ ). Takto bylo postupováno až do porušení vzorku shodně pro všechny vzorky. Při únavovém zatěžování byl u prvků shodně se vzorkem GFRP.E.Ep.IV.N\_2 pozorován postupný nárůst průhybu uprostřed rozpětí a tlakového přetvoření betonu. Pozorován byl výrazný nárůst průhybu nosníku i přetvoření betonu v tlaku bezprostředně před porušením vzorků. Porušení bylo, shodně pro všechny tři vzorky, způsobené přetržením tažené výztuže. Dva vzorky se porušily na 5. hladině a jeden vzorek na 6. hladině.

Nosníkové zkoušky dále představují podklad pro návrh a únavové testování full-scale prvků – zákrytových desek určených do agresivního prostředí (kap. 3.4.2).

#### **3.4.2 Odolná nosná konstrukce – zákrytová deska**

V návaznosti na výsledky dosažené na malých konstrukčních dílcích (betonové nosníky viz kap. 3.4.1) byl navržen segment přímo pojižděné zákrytové desky určené do vysoce agresivního prostředí. Posudek na únavu respektoval aplikační oblast zákrytových desek, které jsou vystaveny opakovanému zatížení dopravou a byl založen na poznatcích dosažených při řešení dílčích částí disertační práce (především se jednalo o experimentální stanovení únavové životnosti FRP prutů (kap. 3.2.2), soudržnosti FRP výztuže a betonu při únavovém zatěžování (kap. 3.3) a nosníkové únavové zkoušky (kap. 3.4.1)).

Celkově bylo připraveno 5 desek s FRP výztuží a jedna deska s ocelovou výztuží. Jedna deska s FRP výztuží (z.GFRP.E.Ep.IV.N\_5) a deska s ocelovou výztuží (z.ocel\_1) byly pro určení referenční hodnoty mezní únosnosti zatěžovány monotónně až do porušení. Vzorky z.GFRP.E.Ep.IV.N\_1 až z.GFRP.E.Ep.IV.N\_4 byly zatěžovány cyklicky. Deska z.GFRP.E.Ep.IV.N\_4 byla zatěžována na hladině zatížení zabezpečující dosažení únavové životnosti  $2 \times 10^6$  cyklů. Desky z.GFRP.E.Ep.IV.N\_1 a z.GFRP.E.Ep.IV.N\_3 byly zatěžovány únavovým zatížením s postupně vzrůstající amplitudou. Deska z.GFRP.E.Ep.IV.N\_2 byla zatěžována únavovým zatížením s konstantním zatížením na úrovni při které docházelo k výrazné kumulaci porušení u již testovaných desek (předpoklad porušení vzorku v řádu stovek tisíc cyklů).

Na Obr. 7 je zobrazena deska vyztužená FRP výztuží před betonáží. Finální ohybové vyztužení vzorků bylo provedeno následovně: střední pruh je při spodním povrchu vyztužen čtyřmi pruty profilu 18 mm, okraje desky jsou vyztuženy na každé straně šesti pruty profilu 14 mm. Krytí spodní výztuže bylo navrženo 15 mm (GFRP výztuž je vysoce odolná působení vnějších agresivních činitelů a je tak třeba zajistit pouze spolupůsobení s betonem). Pro zabezpečení stanovené

hodnoty krytí byly navrženy 3 řady FRP mřížky tl. 14 mm (ze sortimentu kompozitních litých roštů firmy PREFA Kompozity s obchodním názvem PREFA GRID). FRP mřížky slouží také pro zabezpečení polohy horní výztuže. Krytí horní výztuže je 23 mm (dáno velikostí ok FRP mřížky).



Obr. 7 Kompozitní výztuž zákrytové desky v bednění před betonáží

Jako referenční byla, za stejných okrajových podmínek, navržena zákrytová deska s běžnou betonářskou výztuží. Návrh výztuže vycházel ze stejného požadavku na zatížení proměnným zatížením kategorie G jako varianta s GFRP výztuží. Krytí bylo, z důvodu možnosti srovnání deformačního chování obou variant vyztužení, stanoveno na 15 mm pro horní i dolní výztuž<sup>3</sup>. Výsledné vyztužení desky se skládá z ocelových prutů průměru 14 mm v osové vzdálenosti 200 mm (v celé ploše).

Beton byl navržen jako samozhutitelný pevnostní třídy C45/55. Směs byla realizována s maximální velikostí zrna kameniva 16 mm, a to z důvodu dostupné frakce ve výrobě. S ohledem na relativně malou tloušťku krycí vrstvy betonu je tato hodnota maximální velikosti zrna kameniva hraniční, kompenzovaná volbou samozhutitelné (SCC) směsi. Z důvodu dostupné kapacity výroby byly vzorky betonovány na dvou výrobních linkách (ve dvou různých halách), což vedlo k odlišným vlastnostem betonu.

Popis chování zkušebních vzorků zákrytových desek během zatěžování zajistila řada vhodně rozmístěných snímačů, které zaznamenávaly deformaci a přetvoření nejen samotného vzorku (snímače umístěné na povrchu betonu), ale i přetvoření vybraných prutů výztuže.

Pro určení krátkodobé únosnosti byly staticky zatěžovány vzorky z.GFRP.E.Ep.IV.N\_5 s FRP výztuží a z.ocel\_1 s běžnou betonářskou výztuží. Oba vzorky byly zatěžovány deformačně až do porušení. V průběhu zatěžování byl, kromě deformace a přetvoření materiálů, sledován rozvoj trhlin v betonu a způsob porušení vzorku.

Experimentálně stanovená únosnost u obou monotónně zatěžovaných vzorků významně překonala teoretickou predikci. To je, především u vzorku s FRP výztuží, způsobeno významnou redistribucí zatížení, které nastalo před křehkým porušením vzorku. Vznik trhlin na spodním povrchu desky v místě maximálního momentu (uprostřed rozpětí desky) mělo za následek snížení tuhosti v této oblasti. Důsledkem toho se zvýšilo zapojení částí desky vzdálenějších od středu. Při rostoucím zatížení došlo k intenzivnímu porušení velké části spodního povrchu ohybovými

---

<sup>3</sup> Zákrytová deska je určena do extrémně agresivního prostředí XD3, XF4. Reálná hodnota krytí z hlediska trvanlivosti je pro ocelovou betonářskou výztuž pro dané prostředí 55 mm (s bezpečnostním přídávkem 10 mm).

trhlinami. Výsledné porušení vzorku nastalo v obou případech smykovým porušením – protlačáním.

Po úspěšném provedení referenčních monotónních zkoušek byly provedeny únavové zatěžovací zkoušky. Vzorek zákrytové desky s označením z.GFRP.E.EP.IV.N\_4 byl podroben únavovému vysoko-cyklickému zatěžování s konstantní amplitudou zatížení. Návrh konfigurace zkoušky vycházel z poznatků nabytých v rámci předchozího řešení disertační práce, kdy byly využity výsledky všech doposud provedených testů. Na základně S-N křivky získané na prutech v konfiguraci zabetonovaných prutů byla určena maximální hodnota únavového napětí, při kterém nedojde k únavovému porušení. Tato hodnota odpovídá 20% tahové pevnosti, viz kapitola 3.2.2. Dále byly využity poznatky z testování a použité instrumentace ohýbaných nosníků vyztužených GFRP výztuží, viz kapitola 3.4.1. Při návrhu byl také zohledněn vliv únavového zatížení na soudržnost FRP výztuže, viz kapitola 3.3.

Pro další únavové testování byly navrženy urychlené únavové zkoušky s postupně vzrůstající amplitudou. Tímto způsobem byly testovány vzorky z.GFRP.E.Ep.IV.N\_3 a z.GFRP.E.Ep.IV.N\_1. Zatížení bylo zvyšováno každých 50 000 cyklů o přibližně 5%. První hladina únavového zatížení vzorku z.GFRP.E.Ep.IV.N\_3 byla shodná s únavovým testováním vzorku z.GFRP.E.Ep.IV.N\_4 – únavové zatížení na úrovni přibližně 20% tahové pevnosti výztuže (úroveň zatížení zabezpečující únavovou životnost větší než  $2 \times 10^6$  cyklů). Maximální hladina únavového zatížení byla zvýšena o 5% celkem 5× po provedení 50 000 cyklů na příslušné hladině zatížení. Jelikož neměly nižší hladiny únavového zatížení desky z.GFRP.E.Ep.IV.N\_3 výrazný vliv na kumulaci únavového porušení, byla jako výchozí hladina desky z.GFRP.E.Ep.IV.N\_1 zvolena hladina s maximální silou v cyklu 260 kN, tj. pátá hladina v případě desky z.GFRP.E.Ep.IV.N\_3. Tato hladina byla shodně s předchozími vzorky každých 50 000 cyklů zvýšena o 5% maximální síly v cyklu. Celkem byla deska testována na čtyřech hladinách. Deska z.GFRP.E.Ep.IV.N\_2 byla podrobena únavovému zatěžování s konstantní amplitudou. Na základě vyhodnocení desek z.GFRP.E.Ep.IV.N\_1 a z.GFRP.E.Ep.IV.N\_3 s rostoucí amplitudou byla stanovena hladina maximálního zatížení v cyklu na hodnotu 325 kN (síla odpovídající 4. hladině zatížení vzorku z.GFRP.E.Ep.IV.N\_1).

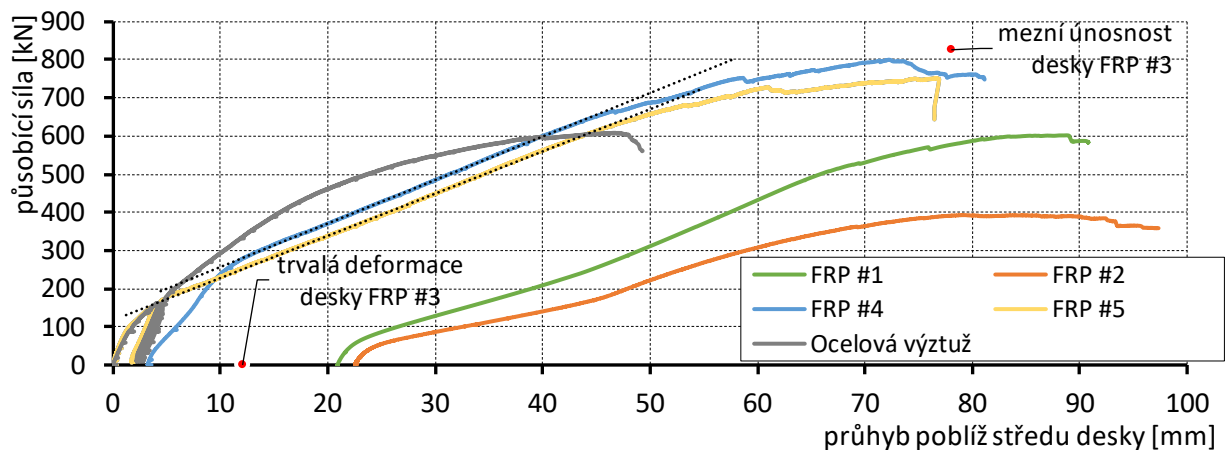
### **Porovnání chování referenční desky s deskami po předchozím únavovému zatěžování**

Na Obr. 8 je provedeno porovnání všech testovaných zákrytových desek s FRP výztuží. Únavové zatěžování desky z.GFRP.E.Ep.IV.N\_4 na hladině maximální síly v cyklu přibližně 160 kN nemělo dle očekávání vliv na monotónní únosnost desky. Hladina maximálního zatížení 160 kN představovala ekvivalentní hodnotu zatížení<sup>4</sup> modelu LM2 reprezentujícího zatížení dopravou. Byla tak ověřena funkčnost navržené zákrytové desky, která je schopna vzdorovat únavovému zatěžování dopravou. V případě desky z.GFRP.E.Ep.IV.N\_3 zatěžované únavovým zatížením se vzrůstající amplitudou byla pozorována výrazná trvalá deformace desky po únavovém zatěžování cca 12 mm. Trvalá/nevratná deformace byla způsobena výrazným porušením betonu ohybovými

---

<sup>4</sup> Z důvodu omezení výrazné působící síly během experimentu, která kladla značené požadavky na zatěžovací zařízení, bylo redukováno množství výztuže v desce na polovinu.

trhlinami, kompozitní pruty však nebyly během únavového zatěžování porušeny. Monotónní únosnost desky 826 kN představuje odchylku 10% od únosnosti referenční desky, což je v rámci rozptylu materiálových charakteristik betonu i FRP výztuže. Na testovaných hladinách byl při únavovém zatěžování pozorován pouze pozvolný nárůst deformace desky. Deska z.GFRP.E.Ep.IV.N\_1 byla shodně vystavena únavovému zatěžování se vzrůstající amplitudou, avšak na vyšších úrovních než deska z.GFRP.E.Ep.IV.N\_3 (první hladina únavového zatížení desky z.GFRP.E.Ep.IV.N\_1 byla shodná s předposlední testovanou úrovní desky z.GFRP.E.Ep.IV.N\_3). Výrazný nárůst deformace desky byl sledován až na hladině zatížení s maximální hodnotou zatížení přibližně 360 kN, což představuje více než dvojnásobnou ekvivalentní hodnotu maximálního zatížení v cyklu pro model zatížení dopravou LM2. Během zatěžování na této hladině zatížení již došlo k porušení FRP výztuže. Při monotónním zatěžování byla zaznamenána snížená ohybová tuhost desky. Mezní únosnost desky byla redukována přibližně o 20%. U desky z.GFRP.E.Ep.IV.N\_2 zatěžované únavovým zatížením o vysoké intenzitě s konstantní amplitudou došlo k výraznému porušení betonu na spodní straně průřezu, k porušení výztuže a také k porušení betonu na horním povrchu poblíž zatěžovací plochy. Po únavovém zatěžování byla sledována značná trvalá deformace desky cca 23 mm. Při následném monotónním zatěžování došlo na rozdíl od předchozích desek k ohybovému porušení desky – na spodním povrchu vznikly výrazné diagonální trhliny a půdorysně nad těmito trhlinami došlo k diagonálnímu tlakovému porušení betonu. Během monotónního zatěžování byly porušeny téměř všechny pruty spodní výztuže. Taktéž došlo k porušení soudržnosti krajních prutů, které procházely diagonální ohybovou trhlinou. Monotónní únosnost byla výrazně redukována (v porovnání s referenční deskou byla redukována mezní únosnost o 48 %).



Obr. 8 Porovnání závislosti průhybu desek na působící síle při monotónním zatěžování

#### 4 Numerická simulace zatěžovací zkoušky zákrytových desek

Pomocí programu GiD 14.0.2 byl vytvořen model desky s dodržением materiálových a geometrických parametrů a způsobu vnášení zatěžovací síly. Okrajové podmínky byly modelovány, aby co nejlépe simulovaly podmínky reálné zkoušky: betonová deska je uložena na ocelových podporách, které umožňují volné pootočení a posun ve vodorovném směru. Mezi ocelové prvky a betonovou deskou byl vložen elastický materiál s nízkým modulem pružnosti pro vyloučení tahového porušení betonu vlivem deformace desky při zatěžování.

Zohledněna je také vlastní tíha desky. Nelineární výpočet je proveden pomocí metody Newton-Raphson v programu Atena 5 3D.

Porovnání chování reálných experimentů s numerickými simulacemi v průběhu únavového zatěžování vykazuje velmi dobrou shodu především při predikci deformace konstrukce. Napětí ve výztuži vzorku z.GFRP.E.Ep.IV.N\_4 a z.GFRP.E.Ep.IV.N\_2 (vzorky vystavené únavovému zatížení s konstantní amplitudou) s velkou přesností odpovídá výsledkům reálného experimentu. Napětí ve výztuži určené pomocí MKP softwaru je u vzorků z.GFRP.E.Ep.IV.N\_1 a z.GFRP.E.Ep.IV.N\_3 výrazně nižší na počátku zatěžování. Při numerické simulaci na nejnižších hladinách únavového zatěžování daných vzorků nedocházelo ke vzniku trhlin v betonu a z tohoto důvodu nebyla výztuž zapojena. Při zvyšování hladin zatížení (po vzniku trhlin) již predikce napětí ve výztuži s vysokou přesností odpovídá výsledkům reálného experimentu. Vzorky vystavené únavovému zatížení s konstantní amplitudou bylo možné velmi přesně simulovat pomocí MKP softwaru, zatímco postupné zvyšování amplitudy znamenalo vyšší odchylky od reálné zkoušky.

Limitujícím faktorem aktuální verze použitého MKP softwaru je nemožnost zadání únavového porušení výztuže (zadání S-N křivky). Nebylo tedy možné v průběhu únavové zkoušky simulovat porušení prutů (při reálném experimentu došlo k porušení prutů během únavového zatěžování desek z.GFRP.E.Ep.IV.N\_1 a z.GFRP.E.Ep.IV.N\_2).

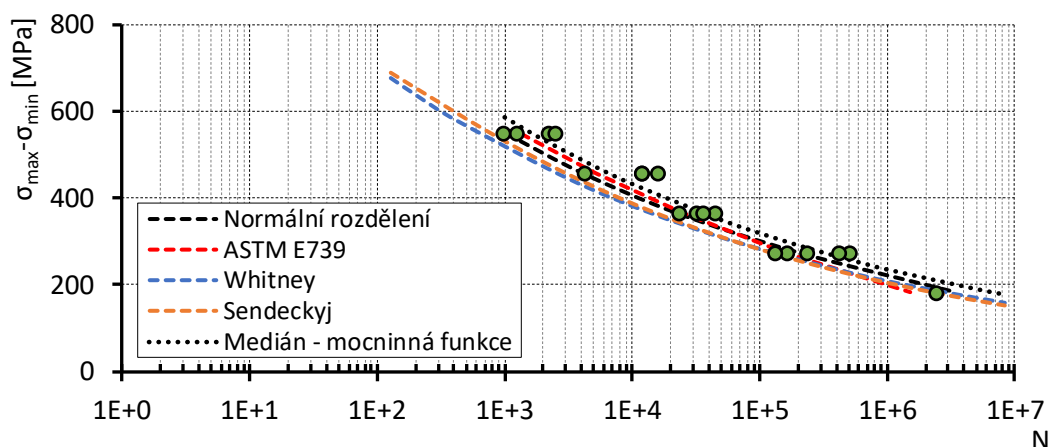
## **5 Statistická analýza dat únavových zkoušek**

Pro účely návrhu musí být únavové chování FRP výztuží na základně dat z experimentálních zkoušek popsáno prostřednictvím rovnic. Deterministické modely však nelze věrohodně vytvořit z důvodu značené nahodilosti vstupních veličin. V případě kompozitních materiálů byla vyzorována až řádově se lišící únavová životnost vzorků testovaných se stejnými okrajovými podmínkami, např. [12] a [13]. To je přisuzováno výrazné anisotropii materiálu, množství lokálních defektů, nerovnoměrnému rozložení vláken po průřezu a jejich rovinnosti [12], možnému rozdílnému způsobu porušení a také značné odchylce v pevnosti jednotlivých vláken, [14] a [15].

Cílem této kapitoly je analytické stanovení únavové životnosti testovaných GFRP prutů pro interval spolehlivosti 95 % (5 % kvantil představuje dle souboru norem ČSN EN charakteristickou hodnotu). Byly zvoleny 4 modely, pomocí kterých byla provedena statistická analýza. Nejjednodušším modelem je použití normálního rozdělení pravděpodobnosti únavové životnosti s pevně daným variačním koeficientem dle [16]. Následně byl využit a ověřen postup dle ASTM E739-10 [17], který používá log-normální rozdělení únavové životnosti. Model Whitney [18] a Sendeckyj [19] představují nejkompexnější použité modely. Oba modely využívají Weibullova rozdělení pravděpodobnosti únavové životnosti. Bylo prokázáno, že oba modely umožňují velmi efektivní popis únavového chování kompozitních materiálů na libovolně zvolené úrovni spolehlivosti.

Pomocí výše uvedených modelů bylo provedeno statistické vyhodnocení únavových zkoušek vzorků v konfiguraci FRP prutů v betonových blocích pro oba testované typy GFRP výztuží (GFRP.E.EP.II.N.10 a GFRP.E.VE.R.12), viz kap. 3.2.2.

Všechny použité modely jsou pro opískované pruty GFRP.E.EP.II.N.10 vyneseny na Obr. 9 pro 5% kvantil únavové životnosti. Průběh (sklon) S-N křivek je ve vykreslené oblasti obdobný pro všechny použité modely. Zjednodušený model využívající normální rozdělení s pevně daným variačním koeficientem a postup dle ASTM E739 se nacházejí velmi blízko průběhu mocinné funkce získané kalibrací na základě metody nejmenších čtverců. Pro danou experimentální sadu výsledků tak dávají méně konzervativní výsledky než komplexnější modely Whitney a Sendeckyj. Modely Whitney a Sendeckyj ve sledované oblasti vykazují téměř totožné průběhy. Oba tyto modely mají své výhody i nevýhody. Výhodou obou modelů je možnost libovolné volby úrovně spolehlivosti. Další výhodou Whitney modelu je snadná kalibrace a možnost zahrnutí vzorků, u kterých nedošlo k porušení během únavového zatěžování. Daný model však nelze použít na hladiny zatížení, na kterých byl testován pouze jeden vzorek. Model Sendeckyj umožňuje zohlednit vzorky testované monotónně do porušení, a to bez i s předchozím vystavením vzorků únavovému zatěžování. Pro vyhodnocení navíc není nutné, aby bylo provedeno více testů na jedné hladině únavového zatížení. Model Sendeckyj dále umožňuje jako jediný použitý model velmi efektivně popsat oblast nízko-cyklické únavy. Nevýhodou je složitější kalibrace parametrů modelu s nutností optimalizačního procesu.



Obr. 9 Statistické vyhodnocení únavových zkoušek GFRP.E.EP.II.N.10–5 % kvantil

Jednoduchý model s využitím normálního rozdělení a pevně daného variačního koeficientu nelze pro daný soubor experimentálních výsledků věrohodně použít. Tento model nedokáže pružně reagovat na skutečný rozptyl v únavové životnosti. Model dle ASTM E739 predikuje v porovnání s ostatními modely nejvyšší únavovou životnost (především v oblasti s menším počtem cyklů do porušení). Modely Whitney a Sendeckyj umožňují efektivně predikovat únavovou životnost kompozitních prutů pro libovolný kvantil. Model Whitney je vhodné použít, pokud je testováno více vzorků na stejné hladině zatížení. Model Sendeckyj představuje za cenu mírně složitější kalibrace velmi účinný model, který dokáže propojit data z únavových i statických zkoušek a efektivně tak popsat oblast nízko-cyklické únavy.

## 6 Závěry a doporučení pro praxi

V rámci disertační práce bylo pomocí rozsáhlého experimentálního programu ověřeno, že únavové zatížení výrazně ovlivňuje chování betonových konstrukcí vyztužených FRP výztuží. Únavové zatížení negativně ovlivňuje nejen deformace konstrukčního prvku, ale při dostatečně

vysoké úrovni zatížení může vést k porušení soudržnosti mezi výztuží a betonem případně až k porušení samotných výztužných prutů. Z tohoto důvodu je nutné u cyklicky zatížených betonových konstrukcí s FRP výztuží dodržet maximální dovolené limity napětí ve výztuži a v soudržnosti. Na základě vyhodnocení únavových zkoušek byly pro FRP pruty stanoveny S-N křivky omezující maximální napětí v cyklu a také rozkmit napětí. Obdobně byly sestrojeny také S-N křivky pro soudržnost mezi FRP výztuží a betonem. Předpoklad predikované únavové životnosti byl ověřen na jednoduchých nosíkových vzorcích vyztužených GFRP výztuží. Následně byl na základě stanovených limitních hodnot proveden návrh vysoko-cyklicky zatížených konstrukčních prvků zákrytových desek určených do agresivního prostředí. Únavové testování těchto prvků prokázalo velmi příznivé únavové chování prvků vyztužených kompozitní GFRP výztuží.

Výsledky z dosažených experimentů byly průběžně publikovány na odborných konferencích a v odborných časopisech.

### **Naplnění stanovených cílů práce**

Výsledky soudržnosti mezi kompozitní výztuží a betonem výrazně rozšířily výsledky dostupné ve světové literatuře. Rozsáhlá databáze testů soudržnosti je nutná při postupném zavádění kompozitních výztuží do návrhových norem. Zkoušky soudržnosti byly provedeny na různých šaržích opískovaných prutů i na žebírkových prutech. Bylo provedeno unikátní porovnání dosaženého maximálního napětí v soudržnosti pomocí centrických pull-out testů, excentrických pull-out testů i nosíkových testů. Dalším měněným parametrem zkoušky byla také pevnost betonu. Bylo potvrzeno, že se zvyšováním pevnosti betonu se zvyšuje také maximální dosažené napětí v soudržnosti, a to i při zvyšování tlakové pevnosti betonu nad 30 MPa (ve [11] je uveden předpoklad, že zvyšování pevnosti betonu nad 30 MPa vzhledem k předpokládanému porušení povrchu výztuže neovlivňuje maximální napětí v soudržnosti, tento předpoklad tedy není platný pro kompozitní výztuže s velmi kvalitní úpravou povrchu). Bylo potvrzeno, že kompozitní výztuž s žebírky vyvozuje větší radiální napětí v okolí soudržnosti – při použití malé krycí vrstvy bylo výrazněji redukováno mezní napětí v soudržnosti vlivem roztržení krycí vrstvy než v případě opískovaného povrchu. V teoretické části byly využity dostupné modely pro analytický popis závislosti posuvu výztuže na napětí v soudržnosti. Použity byly nejběžněji využívané modely pro kompozitní pruty, které lze využít při nelineární numerické simulaci betonových konstrukcí vyztužených kompozitní výztuží.

Byly úspěšně provedeny únavové zkoušky GFRP prutů. V odborné literatuře často zmiňované porušení v blízkosti ocelových kotevních koncovek se podařilo eliminovat použitím betonových bloků, do kterých byla výztuž zakotvena. Byl tak nalezen efektivní způsob únavového testování kompozitních výztuží.

Byly sestrojeny S-N křivky pro dva odlišné typy GFRP výztuže s využitím mocninné i logaritmické funkce. Porovnáním S-N křivek pro dva různé typy GFRP výztuží (s výrazně odlišnou tahovou pevností) bylo zjištěno, že je výhodnější porovnávat únavovou životnost různých druhů FRP výztuží na úrovni rozkmitu napětí namísto procentuální hodnoty napětí k tahové pevnosti (v odborné literatuře obvyklejší). Pro opískované pruty byla vytvořena S-N křivka v celém doporučeném rozsahu, tj. 1 000 -  $2 \times 10^6$  cyklů. Hodnota napětí, která zabezpečuje teoreticky



nekonečnou únavovou životnost ( $2 \times 10^6$  cyklů) je pro opískované pruty 20% tahové pevnosti, což je hodnota plně v souladu s ACI 440.1R-15 [20]. Dále byl kvantifikován vliv frekvence zatěžování na únavovou životnost GFRP prutů. Bylo experimentálně potvrzeno, že je dosažená únavová životnost při frekvenci zatěžování 10 Hz výrazně nižší, než při frekvenci 4 Hz. Snižování frekvence pod 4 Hz dále nemá výrazný vliv na únavovou životnost. Pomocí zkoušky interlaminárního smyku bylo potvrzeno, že má velikost rozkmitu zatížení (při zachování shodné hodnoty maximálního napětí v cyklu) výrazný vliv na interlaminární smykovou pevnost, z čehož lze nepřímo usuzovat na rozdílnou úroveň porušení kontaktu mezi maticí a vlákny.

Na úspěšně provedené monotónní nosníkové zkoušky soudržnosti navázaly únavové zkoušky soudržnosti ve stejné konfiguraci testu. Byly tak pro oba testované typy kompozitní výztuže vytvořeny S-N křivky udávající únavovou životnost v závislosti na napětí v soudržnosti. Vznikl tak ve světě zcela unikátní soubor dat. S-N křivky udávající únavovou životnost kontaktu výztuže s betonem byly dále propojeny s S-N křivkami popisujícími únavovou životnost kompozitních prutů. Byla tedy stanovena hranice napětí, která představuje přechod mezi únavovým porušením prutu a únavovým porušením soudržnosti. Vypozorován byl mírně odlišný způsob porušení soudržnosti opískovaných prutů při rozdílném počtu cyklů do porušení – při nižším počtu cyklů do porušení došlo ke kombinovanému porušení oddělením opískování od jádra průřezu a smykového porušení betonu, zatímco při vyšším počtu cyklů do porušení (při nižších hladinách zatížení) bylo porušení soudržnosti způsobeno oddělením opískování od jádra výztuže na téměř celé oblasti soudržnosti.

Na základě výše stanovených S-N křivek pro únavovou životnost prutů a soudržnosti byly navrženy a úspěšně otestovány betonové nosníky vyztužené GFRP výztuží. Monotónní ohybová únosnost s velkou přesností odpovídá vypočtené hodnotě (rozdíl pouze 1,5%). Na základě tahových únavových zkoušek byla stanovena limitní hodnota napětí, která zabezpečuje teoreticky nekonečnou únavovou životnost kompozitní výztuže (20% tahové pevnosti). Na této hladině byl úspěšně testován první únavově zatížený nosník. U nosníku během únavového zatěžování dle předpokladu nedošlo k porušení a nebyla výrazně ovlivněna ani následná zbytková únosnost (rozdíl 1,6%). Následně byly na třech nosnících provedeny urychlené únavové zkoušky se vzrůstající amplitudou zatížení. Únavová životnost byla porovnána s predikovanou únavovou životností stanovenou na základě Minerova pravidla o lineárním sčítání únavy. Všechny nosníky překonaly predikovanou únosnost. Únavové testování betonových nosníků vyztužených FRP výztuží splnilo svůj účel, kterým bylo ověření vstupních parametrů získaných v rámci předchozího řešení disertační práce. Ověřena byla taktéž vhodnost použité instrumentace pro únavové zkoušky. Poznatky z řešení nosníků sloužily jako velmi cenný podklad pro návrh a únavové testování full-scale vzorků přímo pojížděných zákrytových desek s GFRP výztuží určených do agresivního prostředí.

Posledním bodem experimentálního programu bylo full-scale testování konstrukčních prvků (zákrytových desek) vystavených únavovému zatížení. Úspěšně byl proveden jak referenční monotónní zatěžovací test, tak především únavové zkoušky. Obdobně jako u nosníkových zkoušek byla ověřena hladina zatížení, která zabezpečuje teoreticky nekonečnou únavovou

životnost. Při této hladině dochází při únavovém zatěžování ke kumulaci trvalé deformace, ohybová tuhost však není výrazně ovlivněna (shodně s nosníkovou zkouškou se v průběhu zatěžování nemění rozdíl mezi minimálním a maximálním průhybem v cyklu). Dle předpokladu nebyl vzorek během únavového zatěžování porušen a zbytková únosnost určená následným monotónním zatěžováním do porušení nebyla předchozím únavovým zatěžováním ovlivněna. Výrazné kumulované porušení vznikalo až při dvojnásobné hodnotě zatížení, což bylo zjištěno únavovým testováním dalšího vzorku. Experimentálně tak byl prokázán značný potenciál kompozitních výztuží pro aplikace v prvcích vystavených opakovanému zatěžování (např. dopravou).

Pomocí MKP programu ATENA 3D bylo možné velmi efektivně simulovat chování reálné desky při monotónním zatěžování. Taktéž bylo možné velmi dobře předpovídat nárůst kumulovaného porušení únavově zatěžovaných desek s konstantní amplitudou zatížení především při nižší hladině únavového zatížení. Výraznou slabinou aktuální verze použitého software je však nemožnost modelování únavového porušení výztuže, ke kterému došlo u několika experimentálně testovaných vzorků. Pokud je tedy hladina zatížení dostatečně nízká, aby nedošlo k porušení kompozitních prutů, lze chování reálného prvku dostatečně přesně modelovat pomocí MKP softwaru ATENA 3D s využitím prostředí GiD.

**Lze tedy prohlásit, že veškeré cíle práce byly úspěšně splněny.**

#### **Doporučení pro praxi – návrh a analytický popis soudržnosti mezi FRP výztuží a betonem**

Pokud technické listy použité FRP výztuže neobsahují hodnoty maximálního napětí v soudržnosti pro příslušné pevnostní třídy betonu, je před návrhem kotevní délky nutné provést testy soudržnosti (z důvodu rozdílných povrchových úprav a vlastností na trhu dostupných FRP výztuží).

V případě numerického modelování soudržnosti GFRP výztuže s betonem je výhodné použít model soudržnosti CMR z důvodu velmi vysoké přesnosti kalibrovaných modelů a jednoduché kalibraci parametrů modelu. Druhou dostatečně výstižnou alternativou je použití modifikovaného BPE modelu, jelikož se vzestupná větev modelu shoduje s modelem soudržnosti ocelové výztuže CEB-FIP Model Code 1990 a tento model je tak často implementován v programech pro nelineární analýzu vyztužených betonových konstrukcí.

#### **Doporučení pro praxi – mezní hodnoty napětí při únavovém zatížení**

U testovaných opískovaných prutů byla hodnota maximálního napětí v cyklu pro dosažení teoreticky nekonečné únavové životnosti ( $\geq 2 \times 10^6$  cyklů) výztužných prutů stanovena na 20% tahové pevnosti, což je hodnota plně v souladu s doporučením směrnice ACI 440.1R-15 [20]. Uvedená hodnota je platná pro konzervativní hodnotu parametru asymetrie 0,1 (hodnota minimálního napětí v cyklu odpovídá 10% maximálního napětí). Z toho plyne, že rozkmit tahového napětí v rámci zatěžovacího cyklu nesmí pro testovaný typ opískované GFRP výztuže (krátkodobá tahová pevnost 1 018 MPa) přesáhnout 184 MPa. Prokázán však byl výrazný vliv použitého typu výztuže na únavovou životnost. Z tohoto důvodu nelze uvedené doporučení přímo zobecnit pro všechny typy kompozitních prutů.

Kromě porušení výztužných prutů může během únavového zatěžování dojít také k porušení soudržnosti mezi výztuží a betonem, a to především při použití/dodržení velmi krátké kotevní délky. Kotvení prutů ovlivňuje přípustnou hladinu působícího cyklického zatížení. Aby nedocházelo k únavovému porušení kontaktu mezi FRP výztuží a betonem, neměla by pro testované opískované pruty maximální hodnota napětí v cyklu přesáhnout 35% tahové pevnosti výztuže. Obdobně pro testované žebírkové pruty je maximální hodnota napětí omezena na 20% tahové pevnosti. Vzhledem ke způsobu porušení soudržnosti žebírkových prutů (smykové porušení betonu) je však tato hodnota značně závislá na pevnosti použitého betonu. Je nutno též poznamenat, že uvedené výsledky jsou platné pouze pro velmi krátké kotevní délky (pětinásobek průměru prutu). Při uvažování rozkmitu napětí je limitní hodnota pro únavové porušení soudržnosti přibližně shodná pro oba testované typy GFRP výztuží a dosahuje hodnoty cca 250 MPa (to odpovídá rozkmitu napětí v soudržnosti cca 12,5 MPa). Tuto hodnotu však z důvodu značné rozmanitosti na trhu dostupných povrchových úprav různých výrobců nelze obecně aplikovat na jakýkoliv typ výztuže.

Pro statistické vyhodnocení dat únavových zkoušek (únavové životnosti v závislosti na napětí) je doporučeno využít modely Whitney případně Sendeckyj. Model Whitney umožňuje jednoduchou kalibraci a zahrnutí vzorků, které se neporušily během únavového zatěžování. Použití je však možné pouze pokud je testováno více vzorků v jedné sadě. Model Sendeckyj velmi efektivně umožňuje propojení krátkodobé tahové pevnosti s daty únavových zkoušek. Je tak možné popsat oblast nízko-cyklické únavy, kterou nelze pomocí ostatních modelů predikovat. Nevýhodou modelu Sendeckyj je komplikovanější proces kalibrace parametrů s využitím optimalizace. Oba modely umožňují stanovení únavové životnosti pro libovolný kvantil.

## 7 Literatura

- [1] ACI 440.3R-12: *Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Reinforcing or Strengthening Concrete and Masonry Structures*. Farmington Hills: ACI Committee 440, 2012.
- [2] ACHILLIDES, Zenon a Kypros PILAKOUTAS. Bond Behavior of Fiber Reinforced Polymer Bars under Direct Pullout Conditions. *Journal of Composites for Construction*. 2004, **8**(2), 173-181. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2004\)8:2\(173\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2004)8:2(173))
- [3] VELJKOVIC, Ana, Marcin Michal HAFFKE a Matthias PAHN. Concrete cover effect on the bond of GFRP bar and concrete under static loading. *Composites Part B: Engineering*. 2017, **124**, 40-53. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.05.054>
- [4] RILEM-FIP-CEB. Tentative recommendations, recommendations for reinforcing steel, bond test for reinforcing steel: 1—Beam test (7-ii-28 d) 2—Pull-out test (7-ii-128). *Materials and Structures*. 1973, **6**(32).
- [5] AIELLO, Maria Antonietta, Marianovella LEONE a Marisa PECCE. Bond performances of FRP rebars-reinforced concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2007, **19**, 205-213. Dostupné z: doi:[10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:3\(205\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:3(205))
- [6] ISO 10406-1:2015: *Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete — Test methods — Part 1: FRP bars and grids*. 2. Switzerland: International Organization for Standardization, 2015.
- [7] (CSA). *S806-12 - Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers*. ISBN 9781554919314.

- [8] DEMERS, Cornelia. Tension–tension axial fatigue of E-glass fiber-reinforced polymeric composites: fatigue life diagram. *Construction and Building Materials*. 1998, **15**(5), 303-310. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(98\)00007-5](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(98)00007-5)
- [9] ADIMI, Reda, Habib RAHMAN a Brahim BENMOKRANE. New Method for Testing Fiber-Reinforced Polymer Rods under Fatigue. *Journal of Composites for Construction*. 2000, **4**(4), 206-213. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2000\)4:4\(206\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2000)4:4(206))
- [10] RAHMAN, A. H., M. R. ADIMI a Brahim BENMOKRANE. Fatigue Behaviour of FRP Reinforcements Encased in Concrete. In: *Advanced Composite Materials in Bridges and Structures : 2nd International Conference*. Montreal, Quebec, 1996, s. 691–698. ISBN 0-921303-64-5.
- [11] *FRP reinforcement in RC structures: technical report prepared by a working party of Task Group 9.3, FRP (Fibre Reinforced Polymer) reinforcement for concrete structures* [online]. 1st pub. Lausanne: International Federation for Structural Concrete, 2007 [cit. 2017-12-31]. Bulletin Fédération internationale du béton. ISBN 978-2-88394-080-2.
- [12] KIM, H. C. a L. J. EBERT. Fatigue life-limiting parameters in fibreglass composites. *Journal of Materials Science*. 1979, **14**(11), 2616-2624. ISSN 0022-2461. Dostupné z: doi:[10.1007/BF00610630](https://doi.org/10.1007/BF00610630)
- [13] VASSILOPOULOS, Anastasios P. a Thomas KELLER. Fatigue of Fiber-reinforced Composites. *Engineering Materials and Processes*. London: Springer, 2011. Dostupné z: doi:[10.1007/978-1-84996-181-3](https://doi.org/10.1007/978-1-84996-181-3)
- [14] EL-RAGABY, Amr, Ehab EL-SALAKAWY a Brahim BENMOKRANE. Fatigue analysis of concrete bridge deck slabs reinforced with E-glass/vinyl ester FRP reinforcing bars. *Composites Part B: Engineering*. 2007, **38**(5-6), 703-711. ISSN 13598368. Dostupné z: doi:[10.1016/j.compositesb.2006.07.012](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2006.07.012)
- [15] NOËL, Martin. Probabilistic fatigue life modelling of FRP composites for construction. *Construction and Building Materials*. 2019, **206**(2019), 279-286. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:[10.1016/j.conbuildmat.2019.02.082](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.082)
- [16] VASSILOPOULOS, Anastasios P. a Thomas KELLER. *Fatigue of Fiber-reinforced Composites* [online]. 1. London: Springer, 2011. ISBN 978-1-84996-181-3.
- [17] *ASTM E739 - 10 (Reapproved 2015): Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ε-N) Fatigue Data*. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States: ASTM International, 2015.
- [18] WHITNEY, JM. Fatigue Characterization of Composite Materials. *Fatigue of Fibrous Composite Materials*. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International, 1981, , 133-133-19. ISBN 978-0-8031-0719-9. Dostupné z: doi:[10.1520/STP27618S](https://doi.org/10.1520/STP27618S)
- [19] SENDECKYJ, GP. Fitting Models to Composite Materials Fatigue Data. *Test Methods and Design Allowables for Fibrous Composites*. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International, 1981, , 245-245-16. ISBN 978-0-8031-0700-7. Dostupné z: doi:[10.1520/STP29314S](https://doi.org/10.1520/STP29314S)
- [20] *ACI 440.1R-15: Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars*. Farmington Hills: ACI Committee 440, 2015.
- [21] FIB. *Fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Lausanne, Switzerland: International Federation for Structural Concrete (fib), 2012. ISBN 9783433030615.
- [22] *CEB-FIP Model Code 90*. Lausanne, Switzerland, 1993, 460 s. ISBN 0 7277 1696 4.
- [23] ČERVENKA, Vladimír, Libor JENDELE a Jan ČERVENKA. *ATENA Program Documentation, Part 1, Theory* [online]. In: . Praha, 2020.

## Curriculum Vitae

### Osobní údaje

Jméno: Ing. Ondřej Januš  
Datum narození: 22.3.1991

### Vzdělání

2016 – současnost Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební  
Doktorské studium  
Studijní program: Konstrukce a dopravní stavby

2014 – 2016 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební  
Navazující magisterské studium  
Studijní program: Stavební inženýrství  
Studijní obor: Pozemní stavby  
Zaměření: Konstrukce a statika staveb

2010 – 2014 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební  
Bakalářské studium  
Studijní program: Stavební inženýrství  
Studijní obor: Pozemní stavby

### Pracovní zkušenosti

1.7.2018 – současnost Akademický pracovník – asistent  
Ústav betonových a zděných konstrukcí, FAST, VUT v Brně

31.1.2017 – 1.7.2018 Technik pro výzkum a vývoj  
Ústav betonových a zděných konstrukcí, FAST, VUT v Brně

1.2.2018 – 31.12.2018 Práce na výzkumném úkolu Kompozitní i-Korb  
PREFA KOMPOZITY, a.s.

### Odborná vědecko-výzkumná činnost

- TH03020067 – FRP výztuž se zvýšenou spolehlivostí a trvanlivostí při vysoko-cyklickém zatížení, (2018 - 2020, TAČR)
- TA04010881 – Stanovení dlouhodobé spolehlivosti kompozitních výztuží s ohledem na zvýšení jejich užitných vlastností, (2016 - 2017, TAČR)
- FV10505 – Inteligentní kompozitní kotevní prvek, (2016 - 2019, MPO - TRIO)
- FV40278 – Odolné sendvičové nosné prvky z progresivních kompozitních FRP materiálů (2019 – současnost, MPO -TRIO)
- TH04020431 – Rozšíření aplikační oblasti FRP výztuží v betonových konstrukcích (2019 – současnost, TAČR)
- TE01020168 – Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu (CESTI), (2016 - 2019, TAČR)
- TN01000056/05 – Pokročilé konstrukční prvky na bázi dřeva a kompozitů pro objekty občanské výstavby (2019 – současnost, TAČR)
- FAST-J-18-5224 – Zkouška interlaminárního smyku FRP prutů pro rychlé a efektivní hodnocení kvality produktu a stanovení míry degradace
- FAST-J-17-4555 – Únava vnitřních kompozitních výztuží při vysokocyklickém namáhání a jejich soudržnost s betonem

### Studijní pobyt v zahraničí

10.9.2018 – 10.10.2018 Pracovní stáž na Universidade do Porto, Portugalsko  
Téma: Cyklické namáhání konstrukcí  
Vedoucí stáže: prof. Humberto Varum

## Abstrakt

V posledních době kompozitní (FRP – *fibre reinforced polymers*) materiály nacházejí stále širší uplatnění v betonových konstrukcích, a to jak pro zesilování stávajících konstrukcí, tak i při vyztužování nově budovaných betonových prvků. Díky příznivým mechanicko-fyzikálním vlastnostem se tak otevírají nové oblasti návrhu odolných prvků. Použití těchto inovativních materiálů při vyztužování betonových konstrukcí však často vyžaduje modifikaci návrhového postupu používaného při vyztužování klasickou ocelovou výztuží. V současné době je velké množství především mostních konstrukcí ve velmi špatném až havarijním stavu a vyžadující sanaci z důvodu koroze ocelové výztuže. Kompozitní výztuž se v těchto aplikačních oblastech jeví jako vhodná alternativa k ocelové výztuži. Jelikož jsou však mostovky přímo vystaveny opakovanému zatížení dopravou, je posudek na únavu důležitou a často rozhodující částí návrhu. Počet studií zabývajících se únavovým chováním vnitřních FRP výztuží je v současnosti velmi omezený. Především v současnosti neexistuje žádná studie, která by se dostatečně zabývala komplexním stanovením vlivu únavového zatížení na soudržnost mezi výztuží a betonem. Disertační práce se věnuje problematice návrhu betonových prvků vyztužených moderní kompozitní FRP výztuží vystavených působení vysoko-cyklického (únavového) zatížení. Díky provedenému rozsáhlému experimentálnímu programu bylo možné stanovit přípustné limitní hodnoty únavového zatížení pro zabezpečení požadované únavové životnosti. Na základě těchto limitujících hodnot byl proveden návrh a následné únavové testování full-scale betonových prvků přímo pojižděných zákrytových desek určených do agresivního prostředí.

## Abstract

Recently, FRP (*fibre reinforced polymers*) materials are increasingly used in concrete structures, both for the strengthening of existing structures and as an internal reinforcement of concrete elements. It is due to convenient mechanical and physical properties of this kind of material. However, the use of these innovative materials as a reinforcement of concrete structures often requires a modification of the design process used for steel reinforcement. At present, a large number of bridge structures are in a very poor condition and require remediation due to corrosion of the steel reinforcement. Composite reinforcement appears to be a suitable alternative to steel reinforcement in these application areas. However, since bridge decks are directly exposed to repeated traffic loads, fatigue assessment is an important and often crucial part of the design. The number of studies dealing with the fatigue behaviour of internal FRP reinforcement is currently very limited. In particular, there is currently no study that sufficiently deals with the comprehensive determination of the effect of fatigue loading on the bond between FRP reinforcement and concrete. The doctoral thesis deals with the design of concrete elements reinforced with modern composite FRP reinforcement exposed to high-cyclic (fatigue) loading. Thanks to the performed extensive experimental programme, it was possible to determine the permissible limit values of fatigue load to ensure the required fatigue life. Based on these limiting values, the design and subsequent fatigue testing of full-scale concrete roofing slabs intended for aggressive environments was performed.