

## Záverečná karta projektu

Názov projektu Evidenčné číslo projektu **APVV-15-0658****Nemetalické výstuže do betónových konštrukcií vyrábané na Slovensku a inovačné metódy navrhovania proti progresívnym formám zlyhania betónových stavieb**Zodpovedný riešiteľ **prof. Ing. Vladimír Benko, PhD.**Príjemca **Slovenská technická univerzita v Bratislave - Stavebná fakulta**

### Názov pracoviska, na ktorom bol projekt riešený

Katedra betónových konštrukcií a mostov, Stavebná fakulta STU v Bratislave

### Názov a štát zahraničného pracoviska, ktoré spolupracovalo pri riešení

-

### Udelené patenty/podané patentové prihlášky, vynálezy alebo úžitkové vzory, ktoré sú výsledkami projektu

-

### Najvýznamnejšie publikácie (knihy, články, prednášky, správy a pod.) zhrňujúce výsledky projektu – uveďte aj publikácie prijaté do tlače

AUGUSTÍN, Tomáš - FILLO, Ľudovít - HALVONÍK, Jaroslav. Punching resistance of slab-column connections with openings. In Structural Concrete. Vol. 21, no. 1 (2020), s. 278-290. ISSN 1464-4177 (2019: 2.174 - IF, Q2 - JCR Best Q, 0.883 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: CC: 000529231400020 ; SCOPUS: 2-s2.0-85071114490 ; DOI: 10.1002/suco.201900158.

HALVONÍK, Jaroslav - KALICKÁ, Jana - MAJTÁNOVÁ, Lucia - MINÁROVÁ, Mária. Reliability of models aimed at evaluating the punching resistance of flat slabs without transverse reinforcement. In Engineering Structures. No. 188 (2019), s. 627-636. ISSN 0141-0296 (2019: 3.548 - IF, Q1 - JCR Best Q, 1.595 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: CC: 000465058200048 ; SCOPUS: 2-s2.0-85063228843 ; DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.03.055.

STRAUSS, Alfred - BENKO, Vladimír - TÄUBLING, Benjamin - VALAŠÍK, Adrián - ČUHÁK, Marek. Zuverlässigkeit schlanker Betonstützen. In Beton- und Stahlbetonbau. Vol. 112, no. 7 (2017), s. 392-401. ISSN 0005-9900 (2017: 0.717 - IF, Q4 - JCR Best Q, 0.545 - SJR, Q2 - SJR Best Q). V databáze: WOS: 000404800600004 ; SCOPUS ; DOI: 10.1002/best.201700019

BENKO, Vladimír - DOBRÝ, Jakub - ČUHÁK, Marek. Failure of slender concrete columns due to a loss of stability. In Slovak Journal of Civil Engineering. Vol. 27, no. 1 (2019), s. 45-51. ISSN 1210-3896. V databáze: WOS: 000463837900007 ; DOI: 10.2478/sjce-2019-0007.

GAJDOŠOVÁ, Katarína - BORZOVIČ, Viktor - VALAŠÍK, Adrián - GAŽOVIČOVÁ, Natália. Application of GFRP reinforcement in the design of concrete structures and its experimental

evaluation. In Slovak Journal of Civil Engineering. Vol. 26, no. 3 (2018), s. 11-15. ISSN 1210-3896. V databáze: WOS: 000447696600002 ; DOI: 10.2478/sjce-2018-0015.

HALVONÍK, Jaroslav - MAJTÁNOVÁ, Lucia. Experimental investigation of the maximum punching resistance of slab-column connections. In Slovak Journal of Civil Engineering. Vol. 26, no. 3 (2018), s. 22-28. ISSN 1210-3896. V databáze: WOS: 000447696600004 ; DOI: 10.2478/sjce-2018-0017.

BENKO, Vladimír - VALAŠÍK, Adrián - SIVČÁK, Anton. Investigation of Transfer Length in Pretensioned Elements Reinforced by GFRP. In fib 2018 - Better, Smarter, Stronger [elektronický zdroj] : proceedings for the 2018 fib Congress. Abstracts and Full Papers. Melbourne, Australia, October 7-11, 2018. 1. vyd. Lausanne : Fédération internationale du beton (fib), 2018, USB klíč, [6] s. ISBN 978-1-877040-14-6. V databáze: SCOPUS

BORZOVIČ, Viktor - LÁNIOVÁ, Dagmar - ŠVACHULA, Radovan - HALVONÍK, Jaroslav. Differences in bending behaviour of steel and GFRP Reinforced Beams. In fib 2018 - Better, Smarter, Stronger [elektronický zdroj] : proceedings for the 2018 fib Congress. Abstracts and Full Papers. Melbourne, Australia, October 7-11, 2018. 1. vyd. Lausanne : Fédération internationale du beton (fib), 2018, USB klíč, [11] s. ISBN 978-1-877040-14-6. V databáze: SCOPUS

HOLLÝ, Ivan - GAŽOVIČOVÁ, Natália. Experimental investigation of bond between GFRP reinforcement and concrete using pull-out test. In Engineering mechanics 2018 : book of full texts. 24th international conference. May, 14-17, 2018, Svratka, Czech Republic. 1. vyd. Prague : Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Czech Academy of Sciences, 2018, S. 309-312. ISSN 1805-8248. ISBN 978-80-86246-88-8. V databáze: WOS: 000465489800077 ; DOI: 10.21495/91-8-309.

VALAŠÍK, Adrián - BENKO, Vladimír - SIVČÁK, Anton. Transfer length of GFRP rebars for pretensioned elements. In Proceedings of the 12th fib International PhD Symposium in Civil Engineering [elektronický zdroj] : Prague, Czech Republic, August 29-31, 2018. 1. vyd. Praha : Czech Technical University in Prague, 2018, USB klíč, 739-745. ISBN 978-80-01-06401-6. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85053824020.

KESELI, Ondrej - BILČÍK, Juraj - MARČIŠ, Marián. Post-installed shear reinforcement in flat slabs. In Proceedings of the 12th fib International PhD Symposium in Civil Engineering [elektronický zdroj] : Prague, Czech Republic, August 29-31, 2018. 1. vyd. Praha : Czech Technical University in Prague, 2018, USB klíč, s. 871-878. ISBN 978-80-01-06401-6. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85043578094.

KORMOŠOVÁ, Ľudmila - HALVONÍK, Jaroslav - MAJTÁNOVÁ, Lucia. Safety of the Models for Assessment of Punching Resistance of Flat Slabs with Openings Adjacent to the Columns. In 26th Concrete Days 2019 : selected peer-reviewed full text papers from 26th International Conference Concrete Days. November 20-21, 2019, Hradec Kralove, Czech Republic. 1. vyd. Baech : Trans Tech Publications, 2020, S. 186-192. ISSN 1012-0394. ISBN 978-3-0357-1668-9. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85090296474 ; DOI: 10.4028/www.scientific.net/ SSP.309.186.

ŠARVAICOVÁ, Simona - BORZOVIČ, Viktor. The Analysis of Shear Forces Flow around the Supports of Flat Slabs. In 26th Concrete Days 2019 : selected peer-reviewed full text papers from 26th International Conference Concrete Days. November 20-21, 2019, Hradec Kralove, Czech Republic. 1. vyd. Baech : Trans Tech Publications, 2020, S. 216-221. ISSN 1012-0394. ISBN 978-3-0357-1668-9. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85090291883 ; DOI: 10.4028/www.scientific.net /SSP.309.216.

BENKO, Vladimír - DOBRÝ, Jakub - ČUHÁK, Marek. Slender Concrete Columns at the loss of Stability. In fib 2018 - Better, Smarter, Stronger [elektronický zdroj] : proceedings for the 2018 fib Congress. Abstracts and Full Papers. Melbourne, Australia, October 7-11, 2018. 1. vyd. Lausanne : Fédération internationale du beton (fib), 2018, USB klíč, s. [8] s. ISBN 978-1-877040-14-6. V databáze: SCOPUS

VALAŠÍK, Adrián - BENKO, Vladimír - STRAUSS, Alfred - TÄUBLING, Benjamin. Reliability assessment of slender concrete columns at the stability failure. In Computer Methods in Mechanics (CMM 2017) : proceedings of the 22nd International Conference on Computer Methods in Mechanics. 13-16 September 2017, Lublin, Poland. 1. vyd. Melville : American Institute of Physics, 2018, [7] s., art. no. 130010. ISBN 978-0-7354-1614-7. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85041026554 ; WOS: 000426291500113 ; DOI: 10.1063/1.5019140.

GAŽOVIČOVÁ, Natália: Analýza parametrov GFRP výstuže na rozvoj skorých trhlin v betóne. Dizertačná práca, SvF STU v Bratislave, 2018

HANZEL, Ján: Spôľahlivosť modelov na predikciu odolnosti v pretlačení základových pätiiek bez šmykovej výstuže, Dizertačná práca, SvF STU v Bratislave, 2018  
KESELI, Ondrej: Zosilňovanie lokálne podopretých stropných dosiek na účinky pretlačenia dodatočne vloženou šmykovou výstužou, Dizertačná práca, SvF STU v Bratislave, 2018  
VALAŠÍK Adrián: Teoretická a experimentálna analýza betónových dosiek s GFRP výstužou, Dizertačná práca, SvF STU v Bratislave, 2019  
Sonnenschein Róbert: Predikcia a kontrola šírky skorých trhlin v betónových konštrukciách vystužených oceľovou a GFRP výstužou, Habilitačná práca, SvF STU v Bratislave, 2020

### Uplatnenie výsledkov projektu

Výsledky výskumu majú široké uplatnenie v praxi.

Prvá čiastková úloha je zameraná na aplikáciu nekovových výstuží do betónových konštrukcií na báze polymérov vystužených vláknami (FRP). V snahe získať relevantné odporúčania pre stavebnú prax na návrh a zhotovovanie nových, resp. opravu existujúcich nosných konštrukcií s použitím GFRP výstuže boli v rámci dvoch úspešne obhájených dizertačných prác realizované analytické, numerické a experimentálne štúdie. Pre aplikáciu FRP výstuže vo vodonepriepustných betónových konštrukciách sa odporúča:

1. Použitie GFRP výstuže menších priemerov, ktoré poskytuje účinnejšiu kontrolu šírky trhlín.
2. Pri kontrole šírky trhlín v betónových prvkoch vystužených GFRP výstužou je možné aplikovať STN EN 1992-1-1. Na základe uskutočnenej numerickej a experimentálnej štúdie sa koeficient  $k_1$ , zohľadňujúci vplyv povrchovej úpravy výstuže, odporúča pre rebierkovú GFRP výstuž zvýšiť na hodnotu 1,3.
3. Použitie GFRP výstuže v konštrukciách vystavených agresívnemu environmentálnemu alebo prevádzkovému prostrediu (cestné mosty, nádrže ČOV a pod.) výrazne predlžuje ich návrhovú životnosť a znižuje náklady na ich údržbu.
4. Na navrhovanie nosných prvkov namáhaných ohybovým momentom je možné používať vzťahy uvedené v dizertačnej práci [4], pričom sa odporúča ich navrhovať tak, aby porušenie nastalo drvením betónu a nie zlyhaním GFRP výstuže.
5. Na základe experimentálneho vyhodnotenia skúšok sa vopred predpätú GFRP výstuž v betónových prvkoch odporúča navrhovať podľa normy STN EN 1990 kapitoly 5, prílohy D.
6. Pri návrhu GFRP výstuže sa vyžadujú podrobné informácie o použitom type výstuže. Vlastnosti GFRP výstuže sa v závislosti od výrobcu môžu výrazne odlišovať.

Druhá čiastková úloha je zameraná na problematiku odolnosti v pretlačení lokálne podopretých stropných a základových konštrukcií podarilo sa štatisticky vyhodnotiť úroveň spoľahlivosti návrhových modelov, ktoré sú aktuálne používané v praxi pri návrhu stropných a základových dosiek na pretlačenie. Táto skutočnosť je dôležitá najmä z pohľadu hodnotenia existujúcich stropných konštrukcií o ktorých je známe, že nespĺňajú návrhové kritéria platných noriem kým v čase ich návrhu tieto kritéria spĺňali. Naše spoľahlivostné analýzy ukázali, že súčasný návrhový model nemá významnejšie rezervy. To znamená, že existujúce konštrukcie aj keď boli správne navrhnuté majú nižšiu spoľahlivosť v porovnaní so súčasnými požiadavkami. Len v Bratislave bolo identifikovaných 11 stavebných objektov, kde pri návrhu na odolnosť proti pretlačeniu boli urobené chyby. Nižšia spoľahlivosť starých návrhových modelov a chyby pri projektovaní jednoznačne ukazujú inžinierom potrebu zosilnenia týchto konštrukcií v procese rozhodovania či ponechať konštrukciu v pôvodnom stave, alebo ju rekonštruovať. Naopak, v prípade stropov realizovaných ako lokálne podopreté dosky oslabené otvormi v blízkosti podpíer sa ukazujú návrhové modely na zohľadnenie otvorov ako veľmi konzervatívne čo vytvára priestor na prehodnotenie potreby zosilnenia existujúcich konštrukcií a zníženie materiálovej náročnosti nových konštrukcií. V prípade zosilňovania stropných a základových dosiek proti pretlačeniu s použitím vlepaných kotiev z jednej strany bez prevrtania dosky, potvrdili naše experimenty limity tejto technológie s ktorými môže stavebná prax počítať cca s 1,6 násobkom odolnosti bez kotiev. Rozsiahla experimentálna činnosť umožnila sa aktívne zapojiť do činnosti technickej komisie CEN TC250/SC2/WG1/TG4: Shear, Torsion and Punching ktorej úlohou je pripraviť pre druhú generáciu Eurokódu 2 vhodné návrhové modely v oblasti šmyku, krútenia a pretlačenia. Poznatky získané v rámci projektu boli mnohokrát prezentované prof. Halvonikom, zástupcom Slovenska v komisii, pri diskusiách spojených s tvorbou týchto modelov.

Tretia čiastková úloha bola zameraná na overovanie spoľahlivosti používania nelineárnych

metód navrhovania štíhlych betónových prvkov podľa normatívnych metód v európskej norme pre navrhovanie EN 1992-1-1. Experimentálne overovanie správania sa štíhlych betónových stĺpov s dôrazom na ich krehký charakter zlyhania preukázali, že je potrebné definovať parciálny súčiniteľ spoľahlivosti pre stratu stability štíhlych tlačných betónových prvkov, prípadne preveriť index spoľahlivosti a pravdepodobnosti zlyhania definované v európskych normách pre navrhovanie EN 1990-1:2002.

Experimentálne výsledky troch sérií štíhlych betónových stĺpov prevedených v laboratóriách STU SvF v Bratislave sú v súčasnosti hlavným podkladom pre probablistické overovanie pravdepodobnosti zlyhania a indexov spoľahlivosti v pracovnej skupine TG1.4 v organizácii IABSE. Výsledky aj s odporúčaniami pre úpravu používania nelineárnych metód pre tlačné betónové prvky boli prezentované aj v pracovnej skupine CEN TC250/SC2/WG1 pre tvorbu druhej generácie EUROKÓDOV.

V rámci spoločného výskumu s University of California v Berkeley bola analyzovaná americká norma ACI 318-19 a výpočtové metódy pre štíhle železobetónové prvky, pri ktorých je potrebné zohľadniť teóriu druhého rádu. Výsledky tejto štúdie nie sú ešte publikované pretože momentálne prebieha ich spracovanie.

### **Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v slovenskom jazyku (max. 20 riadkov)**

V prípade 1.čiastkovej úlohy. Výsledky numerickej a experimentálnej analýzy preukázali, že na kontrolu šírky trhlín pri použití GFRP výstuže treba približne dvojnásobný stupeň vystuženie ako pri ocelevej výstuži. Betónové konštrukcie vystužené GFRP výstužou sú vhodné najmä pri návrhu na medzný stav vzniku trhlín. Vopred predpätý betón s GFRP výstužou eliminuje problémy so vznikom a šírkou trhlín. Za súčasného stavu poznania je problematický priebeh relaxácie a dlhodobého dotvarovania GFRP výstuže, takže sa odporúča predpätia nenosných prvkov, respektíve prvkov s dočasnou alebo krátkodobou nosnou funkciou.

V prípade 2.čiastkovej úlohy. Na základe štatistickej analýzy spoľahlivosti návrhových modelov na predikciu odolnosti proti pretlačeniu v súčasnosti používaný model EC2 (2004) nemá rezervy z hľadiska bezpečnosti v prípade plných dosiek bez šmykovej výstuže. V prípade základových dosiek a pätiiek je pod požadovanou úrovňou spoľahlivosti. V prípade dosiek oslabených otvormi, použitie modelu ra-diálnej projekcie otvorov do kontrolného obvodu vedie ku konzervatívnym riešeniam, najmä ak sú otvory v líci stĺpa. V prípade rovnobežnej projekcie sa dosahuje veľmi dobrá presnosť bez ohľadu na vzdialenosť otvoru od stĺpa. Pri stenových stĺpoch do odolnosti prispieva celý kontrolný obvod aj napriek koncentrácií šmykových napätí v rohoch. Limity zosilňov. pomocou vlepéných kotiev 1,6.VRd,c

V prípade 3.čiastkovej úlohy. Výsledky experimentov na niekoľkých sériách štíhlych tlačných stĺpov v laboratóriách SvF STU v Bratislave a TU Wien preukázali, že štíhle stĺpy zlyhávajú oveľa skôr ako sa dosiahne odolnosť kritických prierezov. Z týchto dôvodov je potrebné preveriť index spoľahlivosti a pravdepodobnosti zlyhania nakoľko zodpovedajú európskym normovým predpisom – EN 1990-1. Experimentálne výsledky sú v súčasnosti hlavným podkladom pre probablistické overovanie v pracovnej skupine TG1.4 v organizácii IABSE a tiež boli prezentované aj v pracovnej skupine CEN TC250/SC2/WG1 pre tvorbu druhej generácie EUROKÓDOV.

### **Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v anglickom jazyku (max. 20 riadkov)**

In the case of the 1st subtask. The results of numerical and experimental analysis showed that approximately twice the degree of reinforcement was required to control the crack width with GFRP reinforcement as with steel reinforcement. Concrete structures reinforced with GFRP reinforcement are particularly suitable for the design of the limit state of crack formation. Pre-stressed concrete with GFRP reinforcement eliminates problems with the formation and width of cracks. In the current state of knowledge, the course of relaxation and long-term creep of GFRP reinforcement is problematic, so it is recommended to prestress non-load-bearing elements, or elements with temporary or short-term load-bearing function.

In the case of the 2nd subtask. Based on the statistical analysis of the reliability of the design models for predicting the punching resistance, the current EC2 model (2004) has no

safety margins in the case of solid flat slabs without shear reinforcement. In the case of foundation slabs and footings, it is slightly below the required level of reliability. In the case of slabs weakened by openings, the use of a model of radial projection of openings into the control perimeter leads to conservative solutions, especially if the openings are in the face of the column. In the case of parallel projection, very good accuracy is achieved regardless of the distance of the opening from the column. In the case of elongated columns, the entire control perimeter contributes to the punching resistance, despite the concentration of shear stresses in the corners. Strengthening limit using glued anchors is  $1,6 \cdot V_{Rd,c}$

In the case of the 3rd subtask. The results of experiments on several series of slender concrete columns in the laboratories of STU in Bratislava and TU Wien have shown, that slender concrete columns lose stability much before the resistance of critical cross-sections is achieved. Therefore, it is necessary to verify whether the reliability index and the probability of failure meet the requirements of European standard regulations. The experimental results are currently the main basis for probabilistic verification in the TG1.4 working group in the IABSE organization and were also presented in the CEN TC250 / SC2 / WG1 working group for the creation of the second generation of EUROCODES.