

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Stavebná fakulta
Katedra stavebných konštrukcií a mostov

Autoreferát dizertačnej práce na získanie
akademického titulu „philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“

VPLYV KORÓZIE VÝSTUŽE NA SPOĽAHLIVOSŤ BETÓNOVÝCH KONŠTRUKCIÍ

Ing. Michal Zahuranec

Žilina jún 2025

Dizertačná práca bola vypracovaná v rámci externého doktorandského štúdia na Stavebnej fakulte Žilinskej univerzity v Žiline.

Predkladateľ: Ing. Michal Zahuranec
Žilinská univerzita v Žiline, Stavebná fakulta
Katedra stavebných konštrukcií a mostov
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

Školiteľ: prof. Ing. Peter Koteš, PhD.
Žilinská univerzita v Žiline, Stavebná fakulta
Katedra stavebných konštrukcií a mostov
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

Oponenti: 1. prof. Ing. Viktor Borzovič, PhD.
Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta
Katedra betónových konštrukcií a mostov
Vazovova 5, 812 43 Bratislava 1

2. doc. Ing. Miloš Zich, PhD.
Vysoké technické učení v Brně, Fakulta stavební
Betónové konstrukce AdMaS
Antonínská 548/1, 602 00 Brno

3. doc. Ing. Vít Křivý, PhD.
Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební
Katedra konstrukcí
Ludvíka Poděštné 1875/17, 708 00 Ostrava - Poruba

Autoreferát bol rozoslaný dňa
Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa o hod.
v zasadačke dekanátu AE 307 na Stavebnej fakulte Žilinskej univerzity v Žiline, Univerzitná
8215/1, pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce schválenu odborovou komisiou dňa
.....

študijný odbor: Stavebníctvo
študijný program: Teória a konštrukcie pozemných stavieb

S dizertačnou prácou sa možno oboznámiť na referáte pre vedu a výskum dekanátu Stavebnej
fakulty Žilinskej univerzity v Žiline, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.

predseda odborevej komisie
prof. Ing. Marián Drusa, PhD.

ÚVOD	4
1 TÉZY DIZERTAČNEJ PRÁCE.....	4
2 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU RIEŠENEJ PROBLEMATIKY	5
3 AKTUALIZÁCIA KORÓZNYCH MÁP NA SLOVENSKU POMOCOU DOSE- RESPONSE FUNKCIÍ NA VÝPOČET KORÓZNYCH ÚBYTKOV UHLÍKOVEJ OCELE	6
4 EXPERIMENTÁLNE OVERENIE VPLYVU RÔZNEJ ÚROVNE PREDPÄTIA NA RÝCHLOSŤ KORÓZIE V ZÁVISLOSTI OD ČASU A VEĽKOSTI ELEKTRICKÉHO JEDNOSMERNÉHO PRÚDU NA PREDPÍNACÍCH PRVKOCH	9
5 EXPERIMENTÁLNE OVERENIE VPLYVU MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ BETONÁRSKEJ VÝSTUŽE A ÚROVNE JEJ NAPÄTIA NA RÝCHLOSŤ KORÓZIE	13
6 ANALÝZA VPLYVU KORÓZIE PREDPÍNACEJ VÝSTUŽE NA SPOĽAHLIVOSŤ PREDPÄTÉHO PRVKU	23
7 ZÁVER	25
VÝBER Z POUŽITEJ LITERATÚRY	27
PUBLIKAČNÉ PRÁCE AUTORA.....	28

ÚVOD

Faktorov, ktoré môžu vplývať na poškodenie konštrukcií a mostov je mnoho, napríklad posun základov, preťaženie konštrukcie, náhodné mechanické poškodenia a iné. Avšak

poškodenie železobetónových a predpätých konštrukcií dôsledkom korózie výstuže je jedným z najvýznamnejších vplyvov, ktoré ovplyvňujú spoľahlivosť a tiež zostatkovú životnosť konštrukcií a mostov, čo môže viesť k porušeniu konštrukcie a následne aj ku zrúteniu, prípadne ku strate na životoch. Dá sa povedať, že všetky materiály používané v stavebníctve podliehajú degradácii vplyvom agresivity prostredia, v ktorom sa nachádzajú. V stavebníctve sú najpoužívanějšími materiálmi betón, betonárska a predpínacia výstuž. Korózia výstuže je jednou z najznámejších spôsobov degradácie železobetónových prvkov [1, 2].

Fyzikálno-chemické reakcie zapríčinené koróziou trvalo menia chemické, fyzikálne a mechanické vlastnosti materiálu. Samotné prejavy korózie bývajú veľmi rozmanité a závisia od charakteru materiálu (kovu, skla, polymérov), prostredia a všetkých vonkajších a vnútorných faktorov. V prípade betonárskej výstuže alebo predpätej výstuže, korózia v prvom rade (primárne) spôsobuje zmenšovanie priečného rezu výstuže, čo ovplyvňuje odolnosť prvku (medzný stav únosnosti). Následne (sekundárne) môže korózia tiež spôsobiť významné poškodenie ako napríklad trhliny v betóne, hlavne v krycej vrstve, drvenie betónu, korózne sfarbenie alebo iné príznaky poškodenia železobetónu alebo predpätého betónu, prípadne degradáciu samotného betónu. To znamená, že ovplyvňuje aj použiteľnosť konštrukcie (medzný stav použiteľnosti).

Korózia výstuže (korózný úbytok) je pomerne komplikovaný proces, ktorý je možné merať buď v zrýchlených podmienkach v koróznej komore, in-situ na reálnych vzorkách, prípadne urýchleným testom v laboratóriu pomocou elektrochemickej korózie [3, 4]. Je zrejmé, že v rámci celého sveta, a tým aj na Slovensku, sú rôzne agresívne prostredia, ktoré ovplyvnia konečnú hodnotu korózneho rýchlosti.

Z tohto dôvodu je nevyhnutné analyzovať materiály používané v konkrétnych oblastiach so zvýšenou koróznou agresivitou, s cieľom overiť ich odolnosť voči pôsobeniu daného prostredia. Pre komplexnejšie vyhodnotenie správania sa výstuže je vhodné realizovať skúšky nielen v uvoľnenom (nepredpätom) stave, ale aj za pôsobenia napätia vo výstuži – teda pod zaťažaním (v predopnutom stave), ktorý lepšie simuluje reálne prevádzkové podmienky.

1 TÉZY DIZERTAČNEJ PRÁCE

1.1 Úvod k teoreticko-experimentálnej analýze

Koróziu výstuže v betónových konštrukciách je potrebné skúmať na viacerých úrovniach – od klimatických vplyvov po materiálové vlastnosti výstuže. Ide o komplexný fyzikálno-chemický proces, ktorého hlavným dôsledkom je úbytok prierezu výstuže, ovplyvňujúci únosnosť konštrukcie.

Kapitoly 3 až 6 preto pokrývajú rôzne aspekty problému:

- **Kapitola 3** analyzuje regionálne rozdiely v koróznom pôsobení pomocou aktualizovaných máp.
- **Kapitola 4** sa zameriava na vplyv predpätia a elektrického prúdu pri elektrochemickej korózie.
- **Kapitola 5** porovnáva typy výstuže z hľadiska korózneho odolnosti.
- **Kapitola 6** využíva získané dáta v numerickej analýze vplyvu korózie na únosnosť prvkov.

Spoločným cieľom všetkých prístupov je stanoviť úbytok výstuže. Vzájomná kombinácia metód zabezpečuje spoľahlivé a prakticky využiteľné výsledky.

1.2 Ciele dizertačnej práce

Cieľom dizertačnej práce je analyzovať vplyv korózie výstuže na spoľahlivosť betónových konštrukcií a prispieť k prehĺbeniu poznatkov o degradačných procesoch spôsobených pôsobením korózneho prostredia. Výskum sa zameriava na identifikáciu kľúčových faktorov ovplyvňujúcich intenzitu elektrochemickej korózie, predovšetkým na predpínacích tyčiach a betonárskych výstužiach, ako aj na kvantifikáciu ich dopadu na odolnosť nosných konštrukčných prvkov.

V priebehu obhajoby projektu dizertačnej práce boli skúšobnou komisiou schválené nasledujúce tézy:

1. Aktualizácia korózných máp na Slovensku pomocou dose-response funkcií na výpočet korózných úbytkov uhlíkovej ocele.
2. Experimentálne overenie vplyvu rôznej úrovne predpätia na rýchlosť korózie v závislosti od času a veľkosti elektrického jednosmerného prúdu na predpínacích prvkoch.
3. Experimentálne overenie vplyvu materiálových vlastností betonárskej výstuže a úrovne jej napätia na rýchlosť korózie.
4. Analýza vplyvu korózie predpínacej výstuže na spoľahlivosť predpätého prvku.

1.3 Metodika dizertačnej práce

Dizertačná práce v úvode obsahuje ciele práce a problematiku z danej témy a pokračuje prehľadom a spracovaním poznatkov z danej témy a tiež poznatkami z rôznych výskumov a metodík hodnotenia iných inštitúcií a krajín. Práca ďalej obsahuje popis vybraných fyzikálno-chemických parametrov a približuje vplyv korózie na vetonársku a predpínaciu výstuž. Následne je rozobratý proces výskumnej činnosti v oblasti korózie s čiastkovými závermi. V závere sú zhrnuté výsledky z merania a simulácie a spísané závery pre ďalší rozvoj vednej disciplíny a inžiniersku prax.

2 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU RIEŠENEJ PROBLEMATIKY

Korózia betonárskej alebo predpínacej výstuže v betónových konštrukciách predstavuje jeden z najzásadnejších degradačných procesov, ovplyvňujúcich ich životnosť a spoľahlivosť. Ide o komplexný elektrochemický jav, podmienený prenikaním vlhkosti, kyslíka, oxidov a chloridov do pórovitej štruktúry betónu, čo vedie k narušeniu pasívnej vrstvy na povrchu výstuže a následnému vzniku korózneho prúdu.

V odborných publikáciách[5,6,7,8] sú identifikované viaceré formy korózie, pričom najčastejšie v stavebníctve sa vyskytuje rovnomerná a jamková korózia. Druhá menovaná je obzvlášť nebezpečná pre svoju schopnosť koncentrovať poškodenie do obmedzenej oblasti prierezu výstuže. Dôležitý je aj vplyv galvanickej a stresovo-indukovanej korózie, najmä pri kombinovanom pôsobení chemického a mechanického zaťaženia.

Doterajšie výskumy zdôrazňujú vplyv viacerých faktorov, ktoré rozhodujúcim spôsobom ovplyvňujú začiatok a intenzitu korózneho procesu: hrúbka a kvalita krytie výstuže, výskyt trhlín, úroveň predpätia výstuže či expozícia konštrukcie v rôznych klimatických podmienkach.

Na diagnostiku korózie sa využívajú metódy od elektrochemických meraní (potenciál, polarizačný odpor) až po moderné nedestruktívne technológie. Súčasne však existuje vysoká miera variability v spoľahlivosti jednotlivých metód, a preto sa čoraz viac presadzuje kombinované a systematické hodnotenie.

Súčasný stav poznania poukazuje na potrebu komplexného prístupu k hodnoteniu korózie – spájajúceho experimentálne merania, numerické simulácie a reálne pozorovania. Kľúčovou oblasťou výskumu je najmä spresnenie modelov predikcie životnosti konštrukcií, najmä na základe odhadu úbytku prierezu výstuže ako rozhodujúceho parametra pre statické posúdenie.

3 AKTUALIZÁCIA KORÓZNYCH MÁP NA SLOVENSKU POMOCOU DOSE-RESPONSE FUNKCIÍ NA VÝPOČET KORÓZNYCH ÚBYTKOV UHLÍKOVEJ OCELE

3.1 Predpoklady výpočtu korózných úbytkov

Aktuálna norma STN EN ISO 9223 [9] opisuje dva spôsoby stanovenia korózívnej agresivity atmosféry (schopnosť atmosféry spôsobovať koróziu). Buď meranie korózneho účinku na štandardných vzorkách alebo stanovenie koróznej aktivity na základe informácií o prostredí.

V práci sa používa výpočet úbytkov korózie pomocou Dose-response funkcie. Táto metóda je založená na zohľadnení priemernej hodnoty vstupných parametrov ako sú SO₂ (oxid siričitý), CO (oxid uhoľnatý), relatívna vlhkosť RH, teplota T a rýchlosť depozície chloridov.

Metódami, ktoré popisuje norma STN EN ISO 9223 [9] sú rozdelené stupne vplyvov prostredia do 6 základných skupín podľa koróznej agresivity a to od C1, ktorá znamená koróznou agresivitu veľmi nízku až po CX, ktorá znamená extrémnu koróznou agresivitu.

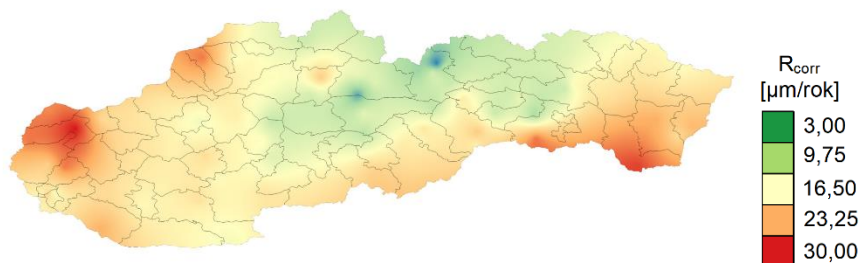
Korózne rýchlosti podľa normy obsahujú hodnoty, ktoré medzi sebou sa nemôžu extrapolovať pre dlhšie časové obdobie. Informácie pre správanie sa materiálov v dlhšom časovom období sú uvedené v norme ISO 9224 [10].

V priebehu rokov bolo vytvorených niekoľko Dose-response funkcií pre základné stavebné materiály, ako je uhlíková oceľ, zinok, meď, hliník, murivo, kameň (pieskovec, vápenec – z pohľadu historických stavieb). Táto práca sa zaoberá pôsobením agresívnej atmosférickej korózie na železobetónové konštrukcie a preto ďalšie výstupy budú vzťahované k uhlíkovej oceli, ktorá prípadne môže byť povrchovo upravená zinkom.

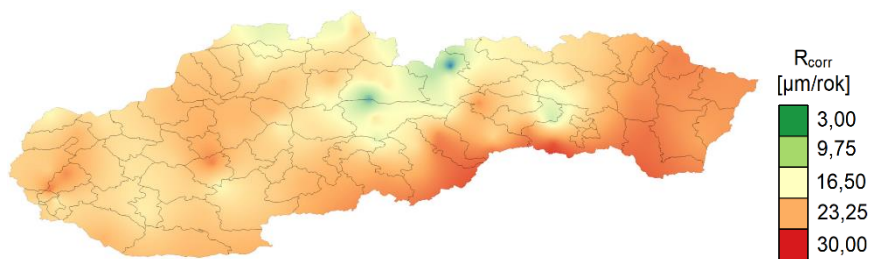
3.2 Tvorba korózných máp

Korózne mapy sú vytvorené pre roky 2017- 2022. Pre výpočet korózných úbytkov boli použité namerané a poskytnuté hodnoty zo SHMÚ pre dané mesiace a roky. Následne pomocou dose-response funkcie boli vyčíslená rýchlosť korózie r_{corr} [$\mu\text{m/rok}$].

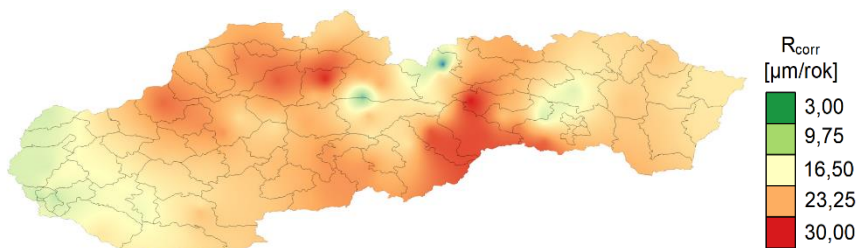
3.3 Priemerná ročná miera korózie r_{corr} na území Slovenska za rok 2017 až 2022



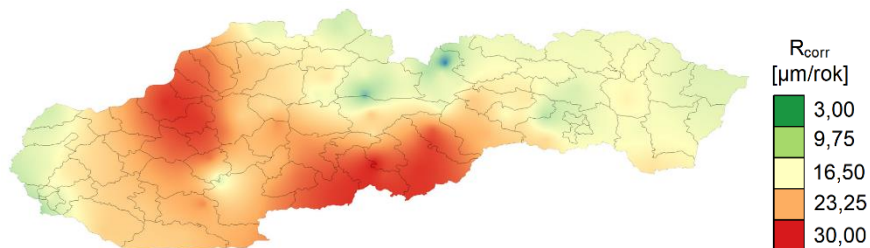
Obr. 1 Priemerná ročná miera korózie r_{corr} na území Slovenska za rok 2017 (jednotka: µm/rok)



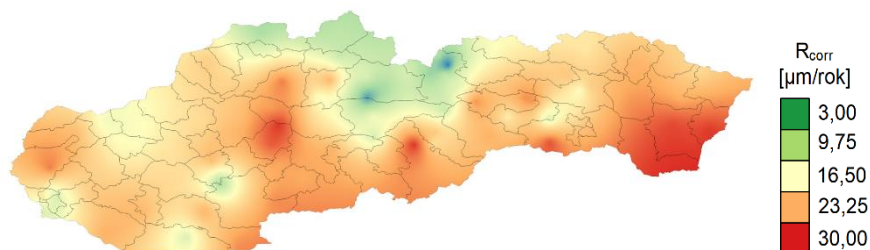
Obr. 2 Priemerná ročná miera korózie r_{corr} na území Slovenska za rok 2018 (jednotka: µm/rok)



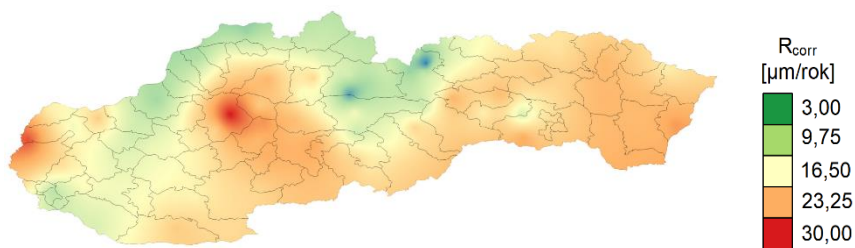
Obr. 3 Priemerná ročná miera korózie r_{corr} na území Slovenska za rok 2019 (jednotka: µm/rok)



Obr. 4 Priemerná ročná miera korózie r_{corr} na území Slovenska za rok 2020 (jednotka: $\mu\text{m/rok}$)



Obr. 5 Priemerná ročná miera korózie r_{corr} na území Slovenska za rok 2021 (jednotka: $\mu\text{m/rok}$)



Obr. 6 Priemerná ročná miera korózie r_{corr} na území Slovenska za rok 2022 (jednotka: $\mu\text{m/rok}$)

3.4 Vyhodnotenie z aktualizovaných korózných mapách

Korózne mapy Slovenska za roky 2017–2022 potvrdzujú, že miera znečistenia ovzdušia a korózneho pôsobenia sa medziročne mení. Najmenej zasiahnuté sú oblasti Tatier ($r_{\text{corr}} \approx 3\text{--}13 \mu\text{m/rok}$), zatiaľ čo najvyššie hodnoty dlhodobo vykazujú regióny východného Slovenska ($r_{\text{corr}} > 18\text{--}20 \mu\text{m/rok}$). Všeobecne platí, že južné Slovensko je korózne aktívnejšie ako severné časti.

Pozitívnym trendom je postupné znižovanie korózných úbytkov v čase. Najčastejšie sa na území SR vyskytujú prostredia koróznej agresivity tried C2 a C3 podľa klasifikácie ISO 9223. Hodnoty nad $r_{\text{corr}} = 25 \mu\text{m/rok}$ boli zaznamenané najmä v okolí Trebišova, Lučenca či Zvolena, čo predstavuje stredné korózne riziko.

Korózne mapy pre roky 2023 a 2024 neboli z dôvodu chýbajúcich dát SHMÚ zatiaľ spracované. Ich doplnenie je plánované v rámci ďalšieho výskumu.

4 EXPERIMENTÁLNE OVERENIE VPLYVU RÔZNEJ ÚROVNE PREDPÄTIA NA RÝCHLOSŤ KORÓZIE V ZÁVISLOSTI OD ČASU A VEĽKOSTI ELEKTRICKÉHO JEDNOSMERNÉHO PRÚDU NA PREDPÍNACÍCH PRVKOCH

4.1 Experimentálny materiál a metodika

4.1.1 Materiál

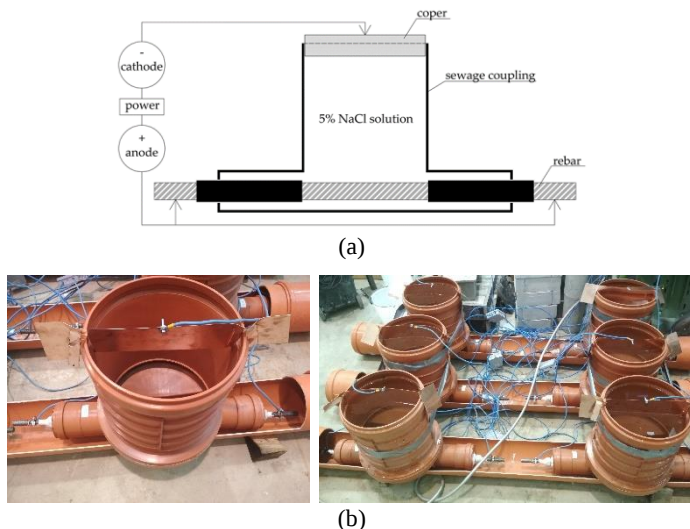
Počas experimentov boli použité celozávitové predpínacie tyče CKT z ocele triedy Y 1050 ($f_{\text{pk}} = 1050 \text{ MPa}$) s menovitým priemerom 18 mm. Tyče s pravotočivým závitom sa bežne používajú v geotechnike a taktiež v mostnom staviteľstve a pozemnom staviteľstve prevažne na kotvenie a spájanie prefabrikátov [11, 12].

Vďaka vysokej pevnosti, opakovateľnej montáži a flexibilitě sú ideálne na efektívne a rýchle kotvenie. Pre svoju praktickú využiteľnosť boli zvolené aj do tohto výskumu. Chemické zloženie ocele Y 1050 poskytol výrobca (C: 0,70 %, Mn: 0,70 %, Si: 0,30 %, P_{max}: 0,035 %, S_{max}: 0,035 %).

4.1.2 Príprava vzorky a zapojenie elektrického prúdu

Korózia predpínacích tyčí bola urýchlená elektrochemickou skúškou s využitím jednosmerného napájacieho zdroja Keysight N8739. Skúšky prebehli v akreditovanom laboratóriu Stavebnej fakulty Žilinskej univerzity.

Vzorky boli čiastočne ponorené do 5 % roztoku NaCl; exponovaná časť bola ponechaná na pôsobenie korózie, zvyšok chránený epoxidom. Anóda bola pripojená na tyč, katóda na medený plech v roztoku. Podmienky testovania boli stabilizované: teplota 20 °C, pH 6,3–7,4.

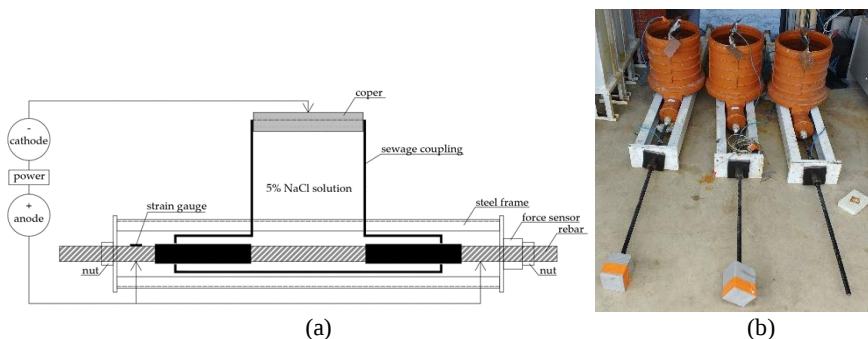


Obr. 7 Schéma a zobrazenie pripojenia obvodu vzorky: (a) schéma zapojenia; (b) fotografia zo skutočného zapojenia

4.1.3 Vplyv veľkosti sily na koróziu

Na základe zistenej medzi pevnosti tyče (235 kN) boli zvolené štyri úrovne predpätia: 0 %, 35 %, 75 % a 90 % (0, 85, 170 a 210 kN). Každá vzorka bola vystavená korózii počas 20 dní (480 h) pri prúde 0,25 A.

Predpätanie sa realizovalo pomocou hydraulického lisu a snímača sily, pričom na tyče boli nainštalované tenzometre. Po uplynutí času sa opätovne zmerala veľkosť ťahovej sily s cieľom vyhodnotiť vplyv korózie.



Obr. 8 Schéma predpätania a zobrazenie pripojenia obvodu: (a) schéma zapojenia v predpätom stave; (b) fotografia zo skutočného zapojenia predpätých vzoriek

4.2 Interpretácia výsledkov

4.2.1 Morfológické charakteristiky korózneho poškodenia

Morfológia korózie vzorky pri rôznom časovom horizonte je znázornená na Obr. 9. Na obrázkoch je vidieť rovnomerné korózne napadnutie. Rovnomerná korózia je charakteristická vyváženým rozpúšťaním celého povrchu materiálu. Po predĺžení času korózie z 10 dní na 20 dní a následne na 30 dní sa hĺbka koróznych jamiek mierne zväčšila, plochy korózie postupne rozširovali, priečne a pozdĺžne rebrá postupne mizli. Celkovo bola hĺbka lokálnych koróznych jamiek relatívne malá, preto morfológia korózie bola definovaná ako rovnomerná.



(a)

(b)

(c)

Obr. 9 Morfológia korózie, na vzorkách namáhaných elektrickým prúdom 0,25 A a časovým horizontom: (a) skorodovaná vzorka po 10 dňoch; (b) skorodovaná vzorka po 20 dňoch; (c) skorodovaná vzorka po 30 dňoch

4.2.2 Účinnosť elektrického prúdu

Účinnosť elektrického prúdu bola vypočítaná podľa Faradayovho zákona ako pomer medzi experimentálnou a teoretickou stratou hmotnosti výstuže. Výsledky (Tab. 1) ukázali účinnosť v rozsahu 92,0 % až 96,4 %, čo je v súlade s literatúrou. Nižšia ako 100 % účinnosť je spôsobená tým, že časť prúdu sa spotrebuje na vedľajšie reakcie, napr. vývoj kyslíka [13].

Tab. 1 Efektívnosť elektrického prúdu

Veľkosť elektrického prúdu (A)	Čas (dni)	Teoretická korózia η_{fr} (%)	Experimentálna korózia η_{ex} (%)	Efektívnosť elektrického prúdu (%)
0,25	10	3,50	3,22	92,00
	20	7,00	6,54	93,42
	30	10,50	9,78	93,14
0,5	10	7,00	6,52	93,14
	20	14,00	13,37	95,50
	30	21,00	20,07	95,57
0,75	10	10,50	10,12	96,38
	20	21,00	20,25	96,43
	30	31,50	29,74	94,41

4.2.3 Výpočet zmeny priemeru výstuže v dôsledku korózie a nameranej experimentálnej úrovne korózie

Miera korózie bola určená ako rozdiel hmotnosti vzorky pred a po expozícii koróznemu prostrediu, vyjadrená v percentách. Keďže korózia prebiehala iba na časti vzorky (300 mm z celkových 1000 mm), hodnota bola upravená podľa pomeru dĺžok.

Na praktické účely bola hmotnostná strata prepočítaná na zníženie priemeru výstuže, keďže ten priamo ovplyvňuje únosnosť prvkov. Výpočet vychádzal z predpokladu valcového tvaru a rovnomernej korózie. Výsledky sú uvedené v Tab. 2.

Tab. 2 Priemer výstuže podľa úrovne experimentálnej korózie

Veľkosť elektrického prúdu (A)	Čas (dni)	η_{ex} (%)	d (mm)
0,25	10	3,22	17,68
	20	6,54	17,33
	30	9,78	16,99
0,5	10	6,52	17,34
	20	13,37	16,61
	30	20,07	15,87
0,75	10	10,12	16,96
	20	20,25	15,85
	30	29,74	14,73

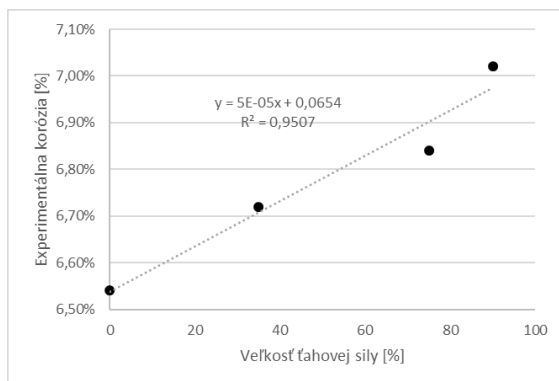
4.2.4 Vplyv veľkosti sily na koróziu

Stupne veľkosti korózie vzoriek pri každej zvolenej veľkosti sily v predpínacej tyči k jednotnému času 20 dní sú uvedené priemerné hodnoty v Tab. 3.

Tab. 3 Stupeň korózie vzoriek od veľkosti sily v závislosti k jednotnému času 20 dní

Veľkosť sily (%)	Čas (dni)	Teoretická korózia η_{fr} (%)	Experimentálna korózia η_{ex} (%)	Efektívnosť elektrického prúdu (%)
0 %	20	7,00	6,54	93,42
35 %	20	7,00	6,72	96,00
75 %	20	7,00	6,84	97,71
90 %	20	7,00	7,02	100,29

Počas korózie sa stupeň korózie vzorky zvyšoval so zvyšovaním veľkosti sily v predpínacej tyči, čo naznačuje, že veľkosť sily ovplyvnila stupeň korózie predpínacej tyče. Pri maximálnej zvolenej veľkosti sily sa stupeň korózie zvýšil o 7,3%, voči nulovej sile, Obr. 10.



Obr. 10 Vplyv veľkosti sily v predpínacej tyči na úroveň experimentálnej korózie za 20 dní

5 EXPERIMENTÁLNE OVERENIE VPLYVU MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ BETONÁRSKEJ VÝSTUŽE A ÚROVNE JEJ NAPÄTIA NA RÝCHLOSŤ KORÓZIE

5.1 Experimentálny materiál a metodika

5.1.1 Materiál pre betonárske tyče

Na experimenty boli použité ocele B500A a B500B s priemerom 10 mm, ktoré sa líšia najmä ťažnosťou a spôsobom výroby, hoci majú takmer rovnaké chemické zloženie.

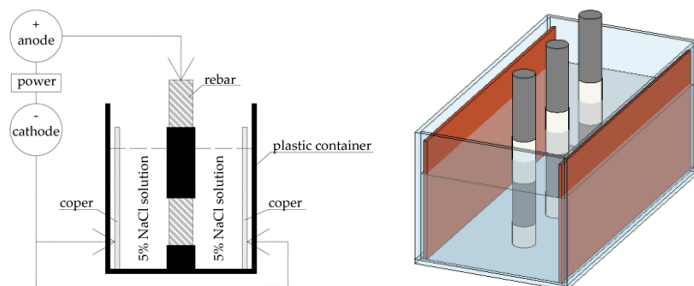
Oceľ B500A sa vyrába studenou deformáciou a má vyššiu pevnosť, no nižšiu ťažnosť a horšiu zvariteľnosť. Je vhodná do prefabrikovaných výstužných prvkov, kde sa nevyžaduje výrazná plastická deformácia.

Oceľ B500B sa vyrába technológiou TEMPCORE, s tvrdým martenzitickým povrchom a húževnatým jadrom. Vďaka lepšej zvariteľnosti a vyššej ťažnosti sa využíva v náročnejších konštrukciách, aj v seizmických oblastiach. Jej korózna odolnosť ostáva predmetom ďalšieho skúmania.

5.1.2 Príprava vzorky a zapojenie elektrického prúdu

Korózia predpínacích tyčí bola urýchlenná elektrochemickou skúškou s využitím jednosmerného napájacieho zdroja Keysight N8739. Skúšky prebehli v akreditovanom laboratóriu Stavebnej fakulty Žilinskej univerzity.

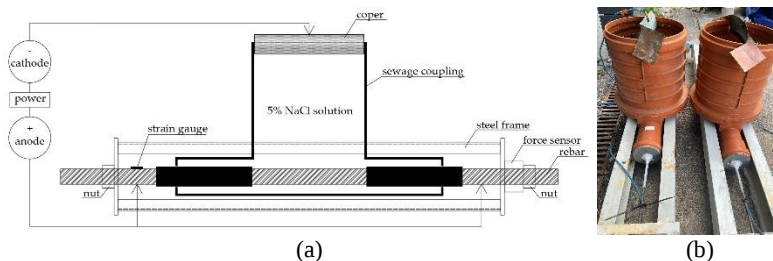
Vzorky boli čiastočne ponorené do 5 % roztoku NaCl; exponovaná časť bola ponechaná na pôsobenie korózie, zvyšok chránený epoxidom. Anóda bola pripojená na tyč, katóda na medený plech v roztoku.



Obr. 11 Schéma a zobrazenie prípojenia obvodu vzorky

5.1.3 Vplyv veľkosti sily na koróziu

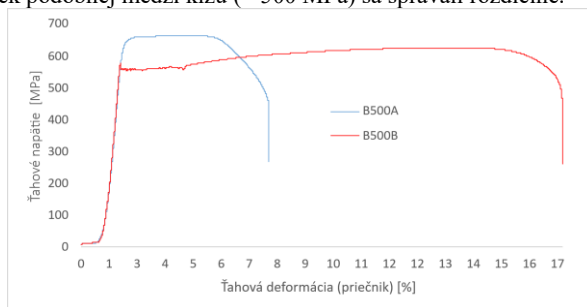
Vzorky betonárskej výstuže boli predpäté na štyri úrovne: 0 %, 50 %, 70 % a 90 % z nameranej medzne pevnosti. Predpätanie sa realizovalo hydraulickým lisom, kde napätie vo výstuži bolo merané pomocou fóliových tenzometrov a snímača sily.



Obr. 12 Schéma predpätania a zobrazenie prípojenia obvodu: (a) schéma zapojenia v predpätom stave; (b) fotografia zo skutočného zapojenia predpätých vzoriek

5.1.4 Vplyv odlišných mechanických vlastností

Pri ťahovej skúške boli porovnávané ocele B500A a B500B so zameraním na ich ťažnosť. Napriek podobnej medzi klzu (≈ 500 MPa) sa správali rozdielne.



Obr. 13 Grafické zobrazenie z ťahovej skúšky betonárskej výstuže

Z výsledkov (Obr. 13) vyplýva, že B500A má vyššiu pevnosť, ale nízku ťažnosť (6,85 %). Po prekročení pevnosti materiál rýchlo zlyháva, preto sa hodí skôr na bežné konštrukcie bez požiadavky na duktilitu.

Naopak, B500B má vyššiu ťažnosť (15,89 %) a stabilnejšie správanie po prekročení medze klzu. Vhodná je pre konštrukcie, kde je potrebná vyššia plasticita – napr. v seizmicky aktívnych oblastiach.

Rozdiel v deformácii po skúške je zreteľný aj na fotografii (Obr. 14), kde výstuž B500B vykazuje výrazne väčšie predĺženie oproti B500A.



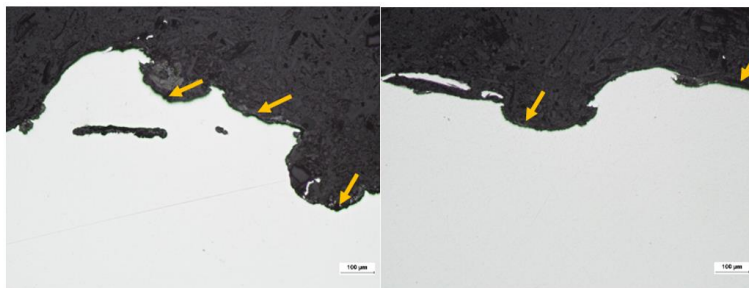
Obr. 14 Fotografia betónárskej výstuže po vykonaní ťahovej skúšky

5.2 Interpretácia výsledkov

5.2.1 Metalografická analýza mikroštruktúrneho korózneho napadnutia

Na vzorkách B500A a B500B bola po korózných skúškach vykonaná metalografická analýza. Vzorky boli v priečnom reze prerezané, zalievané, brúsené a leštené podľa štandardného postupu, následne leptané Nitalom. Pozorovanie prebiehalo na svetelnom mikroskope NEOPHOT 32.

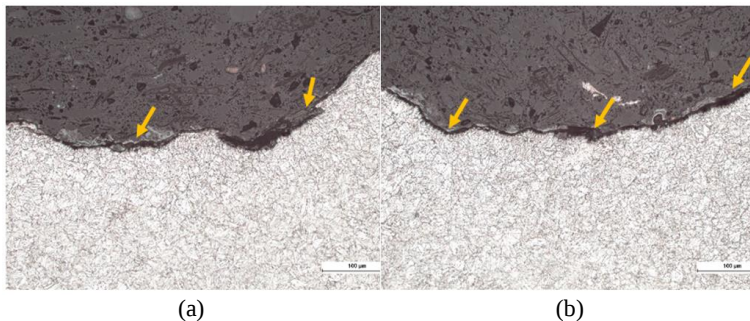
Korózne napadnutie bolo pozorované najmä na povrchu, bez prenikania do jadra materiálu (Obr. 15–16). Mikroštruktúrna analýza neodhalila výrazné rozdiely medzi oceľami B500A a B500B. Tvar aj rozsah poškodenia boli porovnateľné, čo naznačuje, že korózia závisí viac od vonkajších podmienok ako od rozdielov v ťažnosti ocele.



(a)

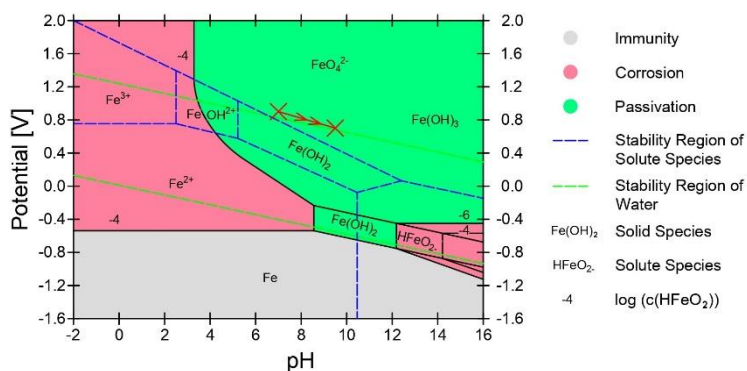
(b)

Obr. 15 Korózne napadnutie na vzorke v neleptanom stave: (a) B500A; (b) B500B



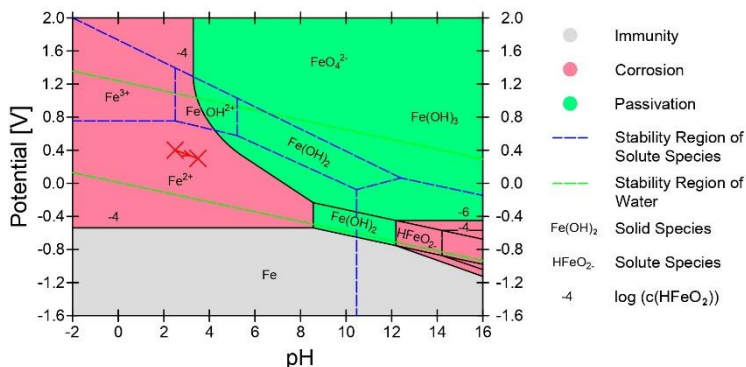
Obr. 16 Korózne napadnutie na vzorke, leptanej 3 % Nitalom: (a) B500A; (b) B500B

5.2.2 Vplyv úrovne pH na pozíciu v Pourbaixovom diagrame



Obr. 17 Pourbaixov diagram železa. Pribeh koróznejskúšky s klasickým soľným roztokom

Počas korózných skúšok sa sledovalo pH roztoku a jeho vplyv na korózne správanie výstuže v kontexte Pourbaixovho diagramu železa (Obr. 17). V klasickom soľnom roztoku pH rýchlo stúplo z 7,16 do pasívnej oblasti, kde sa vytvára stabilná ochranná vrstva.



Obr. 18 Pourbaixov diagram železa. Priebeh koróznej skúšky s upraveným solným roztokom pomocou kyseliny octovej

Pre simuláciu aktívneho korózneho prostredia bolo pH upravené kyselinou octovou na hodnotu 2,5 (Obr. 18). Napriek tomu, že materiál zotrval v aktívnej oblasti, korózna intenzita bola podobná ako pri pasivácii – rozdiel sa prejavil najmä v morfológii poškodenia. Táto diskrepancia medzi teoretickými predpokladmi Pourbaixovho diagramu a praktickými výsledkami súvisí najmä s prítomnosťou vonkajšieho elektrického prúdu, ktorý narúša rovnovážne podmienky a umožňuje pokračovanie korózie aj v pasívnych oblastiach. Rovnako môžu korózne procesy ovplyvniť agresívne ióny (napr. Cl^-) a kinetické obmedzenia reakcií, ktoré nie sú v diagrame zohľadnené [14].

5.2.3 Morfologické charakteristiky korózneho poškodenia

Morfológia korózie pri počiatočnej hodnote pH 2,5, s ohľadom na rôznu dobu času a typu betonárskej výstuže, sú znázornené na, Obr. 19 – 21.

Na obrázkoch je vidieť rovnomerné korózne napadnutie. Rovnomerná korózia je charakteristická vyváženým rozpúšťaním celého povrchu materiálu. Po predĺžení času korózie z 172 800 sekúnd na 345 600 sekúnd a následné na 518 400 sekúnd sa hĺbka korózných jamiek mierne zväčšila, plochy korózie postupne rozširovali, priečne a pozdĺžne rebrá postupne mizli. Celkovo bola hĺbka lokálnych korózných jamiek relatívne malá, preto morfológia korózie bola definovaná ako rovnomerná.



(a)



(b)

Obr. 19 Morfológia korózie, na vzorkách namáhaných elektrickým prúdom 0,1A a časovým horizontom 172 800 sekúnd: (a) B500A; (b) B500B



(a)



(b)

Obr. 20 Morfológia korózie, na vzorkách namáhaných elektrickým prúdom 0,1A a časovým horizontom 345 600 sekúnd: (a) B500A; (b) B500B



(a)

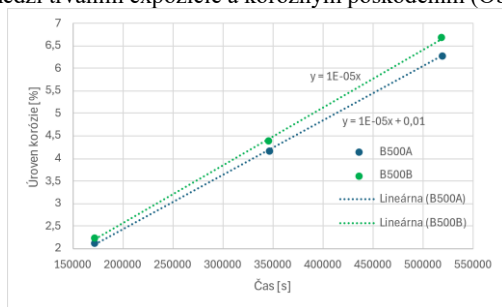


(b)

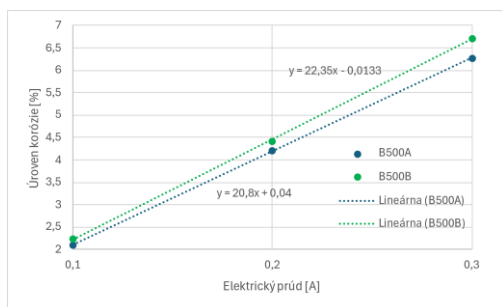
Obr. 21 Morfológia korózie, na vzorkách namáhaných elektrickým prúdom 0,1A a časovým horizontom 518 400 sekúnd: (a) B500A; (b) B500B

5.2.4 7.2.6 Vplyv času a prúdu na korózný úbytok hmotnosti

Výsledky ukázali, že pri stabilnom elektrickom prúde vykazuje korózný úbytok hmotnosti výstuže B500A a B500B v úvodných fázach lineárny priebeh. Ten potvrdzuje priamu úmernosť medzi trvaním expozície a koróznym poškodením (Obr. 22, 23).

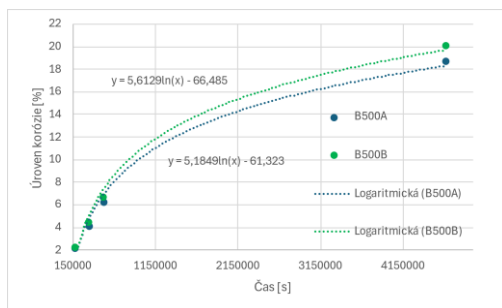


Obr. 22 Lineárny priebeh korózneho úbytku hmotnosti vzoriek v čase s rovnakým elektrickým prúdom

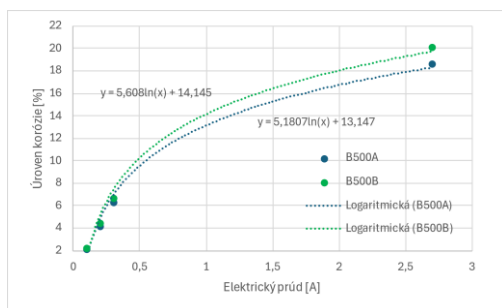


Obr. 23 Lineárny priebeh korózneho úbytku hmotnosti vzoriek voči elektrickému prúdu pri rovnakom časovom horizonte

Pri dlhšom trvaní však dochádza k prechodu na logaritmický priebeh, čo poukazuje na spomalenie korózie v dôsledku formovania ochranných vrstiev alebo obmedzeného transportu iónov (Obr. 24, 25).



Obr. 24 Logaritmický priebeh korózneho úbytku hmotnosti vzoriek v dôsledku predĺženia času s rovnakým elektrickým prúdom



Obr. 25 Logaritmický priebeh korózneho úbytku hmotnosti vzoriek v dôsledku predĺženia času voči elektrickému prúdu pri rovnakom časovom horizonte

Experiment s odstránenou polovicou priemeru vzoriek (Obr. 26) potvrdil, že korózia je najprv rovnomerná, ale pri vyššej hĺbke sa mení mechanizmus degradácie. Tento prechod možno pripísať hromadeniu korózných produktov a vyčerpaniu elektrolytu v okolí výstuže, čo obmedzuje rýchlosť ďalšej oxidácie.



(a)



(b)

Obr. 26 Experimentálna korózia, na vzorkách namáhaných elektrickým prúdom 0,1 A a časovým horizontom 4 665 600 sekúnd: (a) B500A; (b) B500B

Porovnanie výstuží B500A a B500B ukázalo, že B500B dosahuje vyššiu mieru experimentálnej korózie pri rovnakých podmienkach prúdu a času (Obr. 22–25). Efektivita využitia elektrického prúdu bola vypočítaná pomocou Faradayovho zákona ako pomer medzi experimentálnou a teoretickou stratou hmotnosti.

Vyššia korózná rýchlosť pri B500B môže súvisieť s jej odlišnou mikroštruktúrou, povrchovou reaktivitou či nerovnomernou pasivačnou vrstvou. Typické je to najmä pre ocele s legujúcimi prvkami (napr. vanád, chróm, mangán), kde sa tepelným spracovaním (napr. Tempcore) vytvára martenzitická vrstva. Tá síce zvyšuje pevnosť, no môže znižovať koróznú odolnosť. Výsledky potvrdzujú, že zloženie a spracovanie výstuže významne ovplyvňujú jej správanie v elektrolytickom prostredí.

5.2.5 Výpočet zmeny priemeru výstuže v dôsledku korózie a nameranej experimentálnej úrovne korózie

Miera korózie bola určená ako rozdiel hmotnosti vzorky pred a po expozícii koróznemu prostrediu, vyjadrená v percentách. Keďže korózia prebiehala iba na časti vzorky (100 mm z celkových 400 mm), hodnota bola upravená podľa pomeru dĺžok.

Na praktické účely bola hmotnostná strata prepočítaná na zníženie priemeru výstuže, keďže ten priamo ovplyvňuje únosnosť prvkov. Výpočet vychádzal z predpokladu valcového tvaru a rovnomernej korózie. Výsledky sú uvedené v Tab. 4.

Tab. 4 Priemer výstuže podľa úrovne experimentálnej korózie

Materiál	Veľkosť elektrického prúdu (A)	Čas (s)	η_{ex} (%)	d (mm)
B500A	0,1	172 800	2,11	9,57
B500B	0,1	172 800	2,24	9,54
B500A	0,1	345 600	4,17	9,13
B500B	0,1	345 600	4,38	9,08
B500A	0,1	518 400	6,29	8,65
B500B	0,1	518 400	6,67	8,56

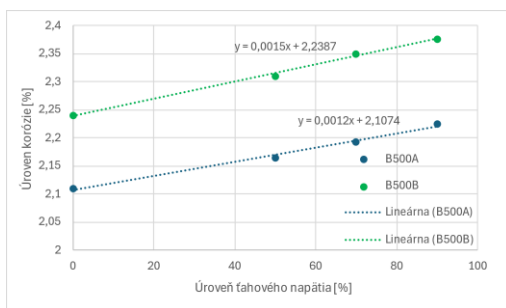
B500A	0,1	4 665 600	18,63	5,05
B500B	0,1	4 665 600	20,09	4,43

5.2.6 Vplyv veľkosti napätia vo výstuži na úroveň korózie

Pri rovnakom čase (172 800 s) a prúde (0,1 A) sa ukázalo, že s rastúcim ťahovým napätím vo výstuži rastie aj úroveň korózie (Tab. 5, Obr. 27). Výstuže typu B500B vykazovali vyššiu citlivosť na predpätie ako B500A. Pri maximálnom zaťažení sa stupeň korózie zvýšil o 5,4 % (B500A) a 6,1 % (B500B) oproti nepredpätým vzorkám. To potvrdzuje, že mechanické namáhanie (natiahnutie vzorky) výrazne ovplyvňuje elektrochemické správanie výstuže.

Tab. 5 Stupeň korózie vzoriek od veľkosti napätia v závislosti k jednotnému času 172 800s a jednotnému elektrickému prúdu 0,1A

Materiál	Veľkosť ťahového napätia na medzi pevnosti (%)	η_{fr} (%)	η_{ex} (%)	Efficiency (%)
B500A	0	2,03	2,11	103,9
B500B	0	2,03	2,24	110,3
B500A	50	2,03	2,16	106,9
B500B	50	2,03	2,31	113,8
B500A	70	2,03	2,19	108,0
B500B	70	2,03	2,35	115,8
B500A	90	2,03	2,22	109,6
B500B	90	2,03	2,38	117,1



Obr. 27 Vplyv veľkosti napätia vo výstuži na úroveň korózie výstuže B500A a B500B

6 ANALÝZA VPLYVU KORÓZIE PREDPÍNACEJ VÝSTUŽE NA SPOLEHLIVOSŤ PREDPÄTÉHO PRVKU

6.1 Metodika analýzy a popis analyzovaného prvku

Nelineárna analýza bola vykonaná v softvéri ATENA 2D [15] na predpätom nosníku s rozpätím 10 m a prierezom 200×600 mm. Model bol vytvorený ako 2D prvok s efektívnou hrúbkou 200 mm. Predpínacie tyče boli modelované ako súdržné prvky, pričom výpočtová sieť bola zahustená v oblasti čistého ohybu.

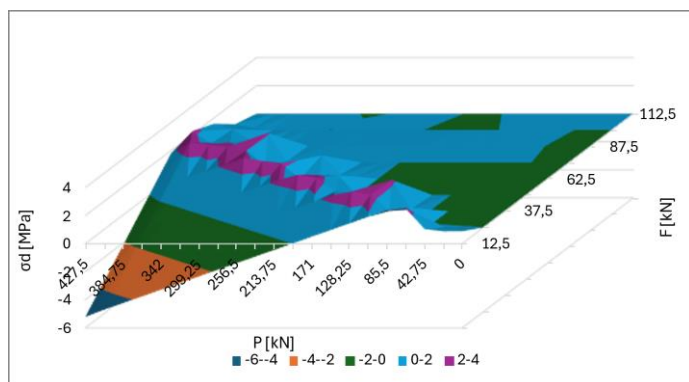
Nosník bol zaťažovaný kombináciou predpätia, vlastnej tiaže a sústredených síl v režime štvorbodového ohybu (kroky po 12,5 kN), s cieľom simulovať realistické namáhanie. Počiatočná predpínacia sila dosahovala 80 % z charakteristickej pevnosti výstuže (t. j. 840 MPa).

Vplyv korózie bol simulovaný postupným znižovaním prierezu výstuže po 5 %, pričom každý stav bol modelovaný samostatne. Mäkká výstuž bola zámerné vynechaná, aby sa vylúčil jej vplyv na priebeh korózie a správanie sa nosníka.

Nosník bol navrhnutý z betónu triedy C30/37 a predopnutý celozávitovou kotevnou tyčou s menovitým priemerom 18mm.

6.2 Porušenie analyzovaného prvku v ťahu

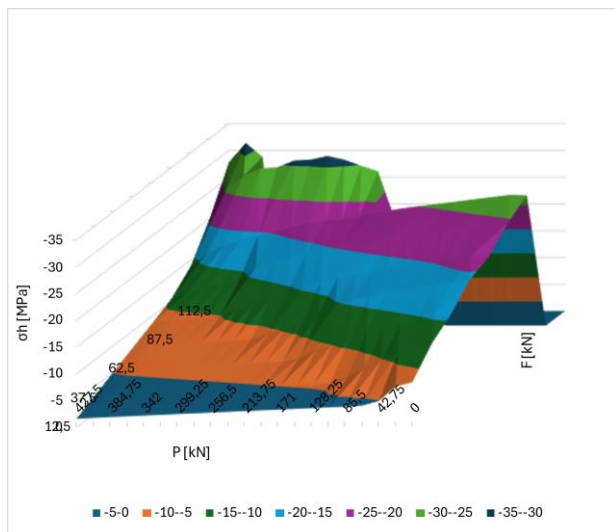
Ak sa pozrieme na závislosť normálových napätí pri spodnom okraji (σ_d) od sily predpínacej výstuže s klesajúcou tendenciou po 5% vplyvom korózie a v kombinácii so zvyšovaním sily, ktorou zaťažujeme analyzovaný nosník, môžeme vidieť podľa Obr. 1, že ak napätia pri spodnom okraji prekročia medznú hodnotu ťahových napätí betónu C30/37, čo je $f_t = 2,665$ MPa, vznikne trhlinka.



Obr. 1 Závislosť σ_d – normálových napätí od zvyšovania F – zaťažovacej sily v kombinácii s P – klesajúcim napätím v predpínacej výstuži vplyvom znižovania priemeru výstuže

6.3 Porušenie analyzovaného prvku v tlaku

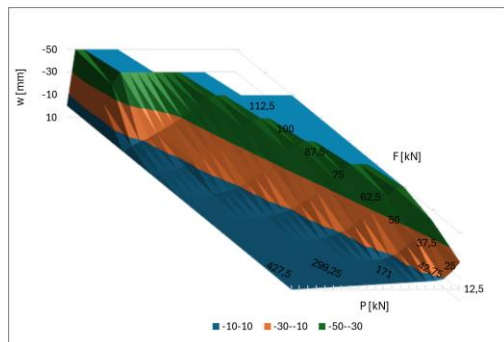
Ak sa pozrieme na závislosť normálových napätí pri hornom okraji (σ_h) od sily predpínacej výstuže s klesajúcou tendenciou po 5% vplyvom korózie a v kombinácii so zvyšovaním sily, ktorou zaťažujeme analyzovaný nosník, môžeme vidieť podľa Obr. 2, že ak normálové napätia pri hornom okraji prekročia medznú hodnotu tlakových napätí betónu C30/37, čo je $f_c = 31,45$ MPa, vznikne porušenie betónu v tlaku.



Obr. 2 Závislosť σ_h – normálových napätí od zvyšovania F – zaťažovacej sily v kombinácii s P – klesajúcim napätím v predpínacej výstuži vplyvom znižovania priemeru výstuže

6.4 Porušenie analyzovaného prvku

Deformáciu analyzovaného nosníka od sily predpínacej výstuže s klesajúcou tendenciou po 5% vplyvom korózie a v kombinácii so zvyšovaním sily, ktorou zaťažujeme analyzovaný nosník, môžeme vidieť podľa Obr. 3.



Obr. 3 Závislosť w – deformácie od zvyšovania F – zaťažovacej sily v kombinácii s P – klesajúcim napätím v predpínacej výstuži vplyvom znižovania priemeru výstuže

7 ZÁVER

Táto dizertačná práca sa zaoberala komplexnou analýzou korózneho poškodenia betonárskej a predpínacej výstuže s cieľom stanoviť jeho vplyv na spoľahlivosť a funkčnosť konštrukčných prvkov. Skúmanie prebiehalo v štyroch navzájom nadväzujúcich krokoch, ktoré zodpovedajú hlavným tézam práce: (1) aktualizácia korózných máp pomocou dose-response funkcií; (2) experimentálne overenie vplyvu úrovne predpätia a elektrického prúdu na rýchlosť korózie predpínacích prvkov; (3) analýza materiálových vlastností betonárskej výstuže a ich súvislosti s rýchlosťou korózie; (4) numerická a experimentálna analýza vplyvu korózie predpínacej výstuže na spoľahlivosť betónového prvku.

V prvej fáze výskumu boli zostavené nové korózne mapy pre územie Slovenska s využitím najnovších metód výpočtu korózných úbytkov pomocou dose-response funkcií. Tieto mapy reflektujú aktuálne environmentálne podmienky a predstavujú významný prínos pre hodnotenie rizikovosti prostredia, v ktorom sa nachádzajú betónové konštrukcie a konštrukcie z predpätého betónu.

V druhej fáze bol pomocou laboratórnych experimentov skúmaný vplyv elektrického prúdu a úrovne predpätia na intenzitu korózie. Výsledky ukázali, že optimálna veľkosť prúdu (0,25 A) zabezpečuje rovnomerné napadnutie bez výskytu kritickej jamkovej korózie na celozávitových kotevných tyčiach. Zároveň sa preukázal vzťah medzi vyšším napätím vo výstuži a zrýchlenou degradáciou jej prierezu.

Tretia fáza bola zameraná na porovnanie korózne odolnosti výstuží tried B500A a B500B. Výrazné rozdiely v ich správaní poukazujú na dôležitosť správneho výberu materiálu pri navrhovaní konštrukcií v agresívnom prostredí. Uplatnením metalografickej analýzy, gravimetrie a výpočtov podľa Faradayovho zákona sa podarilo kvantifikovať úbytok výstuže vo vzťahu k experimentálnym podmienkam.

V poslednej časti bola vytvorená výpočtová metodika založená na MKP (metóde konečných prvkov), ktorou sa hodnotil vplyv postupnej degradácie predpínacej výstuže na celkovú spoľahlivosť nosného prvku. Výsledky numerickej simulácie boli overené s reálnymi experimentálnymi údajmi nameranej v téze číslo dva a potvrdili, že už 5–10 % zníženie prierezu môže viesť k vzniku trhlin v ťahovej oblasti a 40–45 % k celkovému porušeniu prvku.

7.1 Závery pre rozvoj vednej disciplíny

- Práca priniesla aktualizáciu koróznej mapy Slovenska pre konštrukčnú uhlíkovú oceľ na základe meteorologických údajov a korekčných faktorov, ktoré zohľadňujú regionálnu odlišnosť podmienok.
- Kombinácia elektrochemického urýchľovania korózie s výpočtom podľa Faradayovho zákona predstavuje inovatívny metodologický prístup, ktorý umožňuje efektívnu predikciu degradácie výstuže v rôznych prevádzkových stavoch.
- Zavedením analytickej a experimentálnej metodiky bolo možné stanoviť kritické limity pre degradáciu výstuže a ich priamy dosah na medzné stavy spoľahlivosti konštrukcií.
- Významným prínosom je aj systematické overenie správania rôznych druhov výstuže v laboratórnych podmienkach, čo umožní doplniť existujúce databázy materiálových vlastností o chýbajúce korózne charakteristiky.
- Numerické modely boli verifikované na reálnych dátach a môžu slúžiť ako základ pre ďalší vývoj výpočtových nástrojov a štandardizovaných metód hodnotenia životnosti konštrukcií.

7.2 Závery pre inžiniersku prax

- Navrhnutá metodika hodnotenia korózneho poškodenia umožňuje efektívnejšie posudzovanie stavu výstuže v starších betónových konštrukciách, najmä mostných objektov a priemyselných stavieb.
- Práca odporúča aplikáciu aktualizovaných korózných máp pri navrhovaní konštrukcií v oblastiach s vysokou koróznou agresivitou, čím možno predísť poddimenzovaniu výstuže.
- Vďaka experimentálnemu overeniu bolo potvrdené, že pravidelné diagnostiky výstuže so sledovaním parametrov ako je zmena prierezu a intenzita napätia sú nevyhnutné pre predikciu porúch.
- Overené korelácie medzi napätím, prúdom a mierou korózie môžu slúžiť ako vstupné parametre pre návrh urýchlených skúšok a zároveň pre vývoj preventívnych opatrení proti nadmernému opotrebovaniu výstuže.
- Výsledky tejto práce predstavujú použiteľný rámec pre návrh a kalibráciu výpočtových modelov, ktoré sa dajú aplikovať aj v oblasti posudzovania existujúcich objektov, návrhu sanácií alebo pri výpočtoch zostatkovej životnosti nosných konštrukcií.

VÝBER Z POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] Ozbolt, J.; Oršanic, F.; Balabanic, G.; Kušter, M., „Modelling damage in concrete caused by corrosion of reinforcement: Coupled 3D FE model,“ *International Journal of Fracture*, 2012.
- [2] Tu, B.; Dong, Y.; Fang, Z., „Time-Dependent Reliability and Redundancy of Corbared Prestressed Concrete Bridges at Material Component, and System Levels,“ *Journal of Bridge Engineering*, 2019.
- [3] Vizhi, I.M.; Kalirajan, K.; Selvaraj, S., „Study of Carbon Steel Corrosion in 1.0N HCL Medium by Mimulus Elengi Leaves Extract by Electro Chemical Studies,“ *Adv. Sci. Res.*, 2019.
- [4] Bejinariu, C.; Munteanu, C.; Florea, D.C.; Istrate, B.; Cimpoesu, N.; Alexandru, A.; Sandu, V.A., „Elektro-chemical Corrosion of a Cast Iron Protected with a Al₂O₃ Ceramic Layer,“ *Rev. Chim.*, pp. 3586-3589, 2018.
- [5] Wu, X.; Li, L.; Li, H.; Li, B.; Ling, Z., „Effect of strain level on corrosion of stainless steel bar,“ *Constr. Build. Mater.*, pp. 189-199, 2018.
- [6] Bang-Yeon, L.; Koh, K. T.; Ismal, M. A.; Ryu, H. S.; Kwon, S. J., „Corrosion and Strength Behaviors in Prestressed Tendon under Various Tensile Stress and Impressed Current Conditions,“ *Advances in Materials Science and Engineering*, May 2017.
- [7] Jingyuan, L.; Tomohiro, M.; Y., Qiuning; Mingjie, M., „Experimental Study on Prestressing Force of Corroded Prestressed Concrete Steel Strands,“ *Journal of Advanced Concrete Technology*, pp. 550-563, 2022.
- [8] Hui, L.; Xun, W., „Effect of Tension Strain Level on Reinforcement Corrosion,“ *Journal of Materials in Civil Engineering*, March 2018.
- [9] STN EN ISO 9223 Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres - classification, determination and estimation, 2012.
- [10] Ivašková, M.; Koteš, P.; Brodňan, M., „Air pollution as an important factor in construction,“ 7th scientific-technical conference on Material problems in civil engineering MATBUD'2015, pp. 131-138, 2015.
- [11] STN EN 1537, Execution of special geotechnical works. Ground anchors.
- [12] Drusa, M. et.al., „The Role of Geotechnical Monitoring at Design of Foundation Structures and Their Verification - part 2,“ *Civil and Environmental Engineering*, %1. vyd.17(2), pp. 681-689, 2021.
- [13] Nossoni, G.; Harichandran R., „Current Efficiency in Accelerated Corrosion Testing of Concrete,“ *Corrosion - Houston Tx*, . vyd.68(9), pp. 801-809, 09/2012.
- [14] M. Pourbaix, *Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions*, Houston: National Association of Corrosion Engineers, 1974.
- [15] <https://www.cervenka.cz/cz/produkty/atena/>

PUBLIKAČNÉ PRÁCE AUTORA

- **M. Zahuranec**, P. Koteš, J. Kraľovanec, “The influence of the prestressing level of the fully threaded anchor bar on the corrosion rate.” Buildings 13(7):1592 [online]. June 2023. ISSN 2075-5309. Dostupné z: doi: 10.3390/buildings13071592. **Článok je zaradený v databázach Web of Science (Q2) a SCOPUS (Q2).**
- P. Koteš, **M. Zahuranec**, J. Prokop, A. Strauss, J. Matos, “Measurement of corrosion rates on reinforcement using the field test.” ce/papers 6(5):1053-1058 [online]. September 2023. Dostupné z: doi: 10.1002/cepa.2022
- J. Kraľovanec, M. Moravčík, **M. Zahuranec**, F. Bahleda, “In Situ Verification of Tendons of First Segmental Post-Tensioned Road Bridges.” Civil and Environmental Engineering 20(2):920-932 [online]. December 2024. ISSN 1336-5835. Dostupné z: doi: 10.2478/cee-2024-0067
- J. Kraľovanec, M. Moravčík, **M. Zahuranec**, R. Šifta, J. Somer, “Saw-cut method verification for determining the most important factors influencing its applicability.” Structural Concrete 25(6) [online]. December 2024. ISSN 1751-7648. Dostupné z: doi: 10.1002/suco.202400271
- P. Koteš, **M. Zahuranec**, J. Prokop, “Meranie koróznych úbytkov betonárskej výstuže na koróznych staniaciach“ Sanácia betónových konštrukcií, 12 [30.11.2023-01.12.2023, Smolenice, Slovensko]. – [recenzované]. Sanácia betónových konštrukcií [elektronický dokument] : zborník príspevkov z 12. seminára / Sonnenschein, Róbert [Zostavovateľ, editor]. – 1. vyd. – Bratislava (Slovensko) : Slovenská technická univerzita v Bratislave. Spektrum STU, 2023. – ISBN 978-80-227-5370-8, s. 59-66 [online]
- M. Moravčík, J. Kraľovanec, **M. Zahuranec**, R. Šifta, P. Bujňáková, “Popis faktorov ovplyvňujúcich aplikáciu rezovej metódy na jednoducho podopretých predpätých prvkochoch“ Betonárske dni 2024 [elektronický dokument] : zborník príspevkov / Sonnenschein, Róbert [Zostavovateľ, editor]. – 1. vyd. – Bratislava (Slovensko) : Slovenská technická univerzita v Bratislave. Spektrum STU, 2024. – ISBN (elektronické) 978-80-227-5442-2, s. 333-338 [online]
- P. Koteš, **M. Zahuranec**, M. Vavruš, “Diagnostic and design of reconstruction of building Váhostav“ Environmental challenges in civil engineering (ECCE) [textový dokument (print)] : book of abstracts / Zembaty, Zbigniew [Zostavovateľ, editor]. – 1. vyd. – Opole (Poľsko) : Polish association of civil engineers and technicians, 2022. – ISBN 978-83-937864-3-5, s. 43-43 [tlačená forma] DOI 10.1007/978-3-031-26879-3_13
- **M. Zahuranec**, P. Koteš, M. Vavruš, “Vplyv úrovne predpätia celozávitovej kotevnej tyče na rýchlosť korózie“ Betonárske dni 2024 [elektronický dokument] : zborník príspevkov / Sonnenschein, Róbert [Zostavovateľ, editor]. – [recenzované]. – 1. vyd. – Bratislava (Slovensko) : Slovenská technická univerzita v Bratislave. Spektrum STU, 2024. – ISBN (elektronické) 978-80-227-5442-2, s. 359-376 [online]
- J. Kraľovanec, M. Vavruš, **M. Zahuranec**, “Aplikácia vláknotetónu v podkotevnej oblasti dodatočne predpätých konštrukcií“ 29. Betonárske dni 2023 [elektronický dokument] : zborník ke konferenci / Nenadálová, Šárka [Zostavovateľ, editor] ; Švejda Johová, Petra [Zostavovateľ, editor]. – 1. vyd. – Praha (Česko) : Česká betonárska spoločnosť ČSSI, 2023. – ISBN 978-80-908943-0-3, s. 450-460 [USB kľúč]

- P. Koteš, M. Vavruš, J. Prokop, M. Farbák, **M. Zahuranec**, “Diagnostics and evaluation of footbridge structures in town Lučenec, Slovakia” Concrete innovation for sustainability [elektronický dokument] : proceedings for the 6th fib international congress 2022 / Stokkeland, Stine [Zostavovateľ, editor] ; Braarud, Henny Cathrine [Zostavovateľ, editor]. – 1. vyd. – Oslo (Nórsko) : Novus Press, 2022. – ISBN (elektronické) 978-2-940643-15-8, s. 2204-2211 [online]
- M. Vavruš, P. Koteš, **M. Zahuranec**, “Šmyková analýza kontaktu medzi existujúcou a novou vrstvou betónu” Betonárske dni 2022 [elektronický dokument] : zborník príspevkov / Sonnenschein, Róbert [Zostavovateľ, editor]. – 1. vyd. – Bratislava (Slovensko) : Slovenská technická univerzita v Bratislave. Spektrum STU, 2022. – ISBN 978-80-227-5235-0, s. 165-170 [online]
- J. Kraľovanec, M. Moravčík, **M. Zahuranec**, F. Bahleda “Prestressed members subjected to prestressing analysis using stress release technique” ReConStruct: Resilient concrete structures [textový dokument (print)] : proceedings of the 2024 fib Symposium / Henry, Richard S. [Zostavovateľ, editor] ; Palermo, Alessandro [Zostavovateľ, editor]. – 1. vyd. – Lausanne (Švajčiarsko) : International Federational for Structural Concrete, 2024. – ISBN 978-2-940643-25-7. – ISSN 2617-4820, s. 2039-2048 [tlačená forma]
- P. Koteš, M. Vavruš, J. Prokop, M. Farbák, **M. Zahuranec**, “Diagnostika a hodnotenie stavu lávok pre peších v Lučenci” Betonárske dni 2022 [elektronický dokument] : zborník príspevkov / Sonnenschein, Róbert [Zostavovateľ, editor]. – 1. vyd. – Bratislava (Slovensko) : Slovenská technická univerzita v Bratislave. Spektrum STU, 2022. – ISBN 978-80-227-5235-0, s. 323-328 [online]
- **M. Zahuranec**, P. Koteš, J. Kraľovanec, M. Vavruš, R. Gavula “Skúsenosti so zrýchlenými skúškami korózie predpínacích tyčí” 46. aktív pracovníkov odboru oceľových konštrukcií [textový dokument (print)] : zborník prednášok / Gocál, Jozef [Zostavovateľ, editor]. – 1. vyd. – Žilina (Slovensko) : Žilinská univerzita v Žiline, 2023. – ISBN 978-80-554-1967-1, s. 289-296 [tlačená forma]
- P. Koteš, M. Vavruš, **M. Zahuranec**, J. Prokop, “Experiences from static proof-load tests of first bridges reinforced with GFRP reinforcement in Slovakia” Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava [textový dokument (print)] [elektronický dokument] : Řada stavební. – Ostrava (Česko) : Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. – ISSN 1213-1962. – ISSN (online) 1804-4824. – Roč. 22, č. 2 (2022), s. 6-11 [tlačená forma] [online] DOI 10.35181/tces-2022-0007.
- P. Koteš, P. Konečný, P. Lehner, **M. Zahuranec**, “Long-term measurements of reinforcement corrosion on real bridge structure” Modelování v mechanice 2022 [textový dokument (print)] [elektronický dokument] : sborník rozšířených abstraktů / [bez zostavovateľa] [Zostavovateľ, editor]. – 1. vyd. – Ostrava (Česko) : Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2022. – ISBN 978-80-248-4609-5. – ISBN (elektronické) 978-80-248-4610-1, s. 2-2 [tlačená forma] [online]
- M. Vavruš, P. Koteš, **M. Zahuranec**, J. Kraľovanec “Šmyková analýza kontaktu medzi vrstvami „betón-betón“ “ 46. aktív pracovníkov odboru oceľových konštrukcií [textový dokument (print)] : zborník prednášok / Gocál, Jozef [Zostavovateľ, editor]. – 1. vyd. – Žilina (Slovensko) : Žilinská univerzita v Žiline, 2023. – ISBN 978-80-554-1967-1, s. 276-281 [tlačená forma]

- P. Koteš, **M. Zahuranec**, M. Vavruš, “Diagnostika a statická analýza výškovéj budovy Váhostavu v Žiline“ TZB-info [elektronický dokument] : odborný portál pro stavebnictví a technická zařízení budov. – Praha (Česko) : Topinfo. – ISSN (online) 1801-4399. – 2023, s. [1-6] [online]
- P. Koteš, **M. Zahuranec**, M. Vavruš, J. Jošt “Diagnostika a návrh rekonstrukcie výškovéj budovy Váhostav v Žiline“ Beton - technologie, konstrukce, sanace [textový dokument (print)] . – Praha (Česko) : Beton TKS. – ISSN 1213-3116. – Roč. 22, č. 4 (2022), s. 56-59 [tlačená forma]
- P. Koteš, F. Bahleda, M. Farbák, **M. Zahuranec**, J. Odrobiňák “Measurement of reinforcement corrosion on real bridge structure“ Concrete innovation for sustainability [elektronický dokument] : proceedings for the 6th fib international congress 2022 / Stokkeland, Stine [Zostavovateľ, editor] ; Braarud, Henny Cathrine [Zostavovateľ, editor]. – 1. vyd. – Oslo (Nórsko) : Novus Press, 2022. – ISBN (elektronické) 978-2-940643-15-8, s. 2212-2219 [online]
- P. Koteš, **M. Zahuranec**, M. Vavruš, J. Jošt “Diagnostika a návrh rekonstrukcie výškovéj budovy Váhostav“ Betonárske dni 2022 [elektronický dokument] : zborník príspevkov / Sonnenschein, Róbert [Zostavovateľ, editor]. – 1. vyd. – Bratislava (Slovensko) : Slovenská technická univerzita v Bratislave. Spektrum STU, 2022. – ISBN 978-80-227-5235-0, s. 253-258 [online]
- P. Koteš, M. Vavruš, O. Kridla, J. Prokop, **M. Zahuranec** “Diagnostic and assessing the limit states of prestressed concrete railway bridge“ Environmental Challenges in Civil Engineering, 6 [22.04.2024-24.04.2024, Opole, Poľsko]. – [recenzované]. – DOI 10.1007/978-3-031-73776-3_4. – SCO. 2025. ISSN 2366-2557, ISSN 2366-2565 ; 615). – ISBN 978-3-031-73775-6. – ISBN (elektronické) 978-3-031-73776-3, s. 53-66 [tlačená forma] [online]
- M. Vavruš, P. Koteš, **M. Zahuranec**, A. Adamczak-Bugno “Použitie nedeštruktívnej akustickej emisie a numerickej analýzy na sledovanie deformácií vláknobetónu“ Betonárske dni 2024 [elektronický dokument] : zborník príspevkov / Sonnenschein, Róbert [Zostavovateľ, editor]. – [recenzované]. – 1. vyd. – Bratislava (Slovensko) : Slovenská technická univerzita v Bratislave. Spektrum STU, 2024. – ISBN (elektronické) 978-80-227-5442-2, s. 365-370 [online]
- P. Koteš, P. Konečný, P. Lehner, **M. Zahuranec**, “Long-term measurements of reinforcement corrosion on real bridge structure“ Modelování v mechanice 2022 [textový dokument (print)] [elektronický dokument] : sborník příspěvků vědecké konference / [bez zostavovateľa] [Zostavovateľ, editor]. – 1. vyd. – Ostrava (Česko) : Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2022. – ISBN 978-80-248-4609-5. – ISBN (elektronické) 978-80-248-4610-1, s. [1-4] [tlačená forma] [online]