

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE  
Stavebná fakulta  
Katedra stavebných konštrukcií a mostov

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

**TRVANLIVOSŤ PRVKOV OCEĽOVÝCH  
MOSTNÝCH OBJEKTOV**

**Ing. Miroslav Jančula**

Žilina november 2022

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

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

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

Oponenti: 1. prof. Ing. Vincent Kvočák PhD.  
2. doc. Ing. Peter Koteš, PhD.  
3. doc. Ing. Vít Křivý, PhD.

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 schválenou spoločnou odborovou komisiou dňa .....

študijný odbor: stavebníctvo

študijný program: teória a konštrukcie inžinierskych 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 spoločnej odborovej komisie  
prof. Ing. Marián Drusa, PhD.

## ÚVOD

Inžinierske konštrukcie ako nezanedbateľná súčasť infraštruktúry predstavujú v oblasti trvalo udržateľného spoločenského a ekonomického rozvoja významný prvok. Z tohto dôvodu je ich monitoring a údržba veľmi dôležitá. V reálnej prevádzke sa odolnosť nosnej konštrukcie mení v dôsledku pôsobenia rôznych faktorov, akým je napríklad degradácia materiálu koróziou spôsobenou agresívnym prostredím. Napriek dostatočnému množstvu kvalitných protikorózných systémov, fenomén korózie zostáva stále hlavným a najviac významným degradačným účinkom pôsobiacim po celú dobu životnosti konštrukcií. Účinky tejto degradácie spôsobujú materiálové straty a vedú tak k redukcii mechanickej odolnosti konštrukcie. Výskum v oblasti degradačných účinkov agresívneho prostredia na konštrukčnú oceľ je jeden z kľúčových faktorov pri určovaní zvyškovej životnosti jestvujúcich mostov, ako aj pri návrhu nových mostných objektov. V dobe veľkých klimatických zmien je nutné poznať aktuálny stav prostredia, v ktorom sa konštrukcie nachádzajú, preto je potrebné klasifikovať jeho agresivitu. Využitie týchto poznatkov má svoje uplatnenie taktiež pri spresňovaní pravdepodobnostných modelov, ktoré reprezentujú úbytok hrúbky a tým aj pokles odolnosti jednotlivých prvkov konštrukcie v priebehu životnosti.

Význam dopravnej infraštruktúry pre sociálny a ekonomický rozvoj je obrovský, no ruka v ruke s tým prichádza aj potreba hodnotenia existujúcej konštrukcie. Hodnotenie existujúcich mostov predstavuje dôležitý proces a zdroj informácií relevantných pre údržbu alebo opravu a rekonštrukciu mostov. Údaje zozbierané prostredníctvom týchto inšpekcií sú významnou súčasťou systému riadenia mostov. V realizačnej fáze je most riadne kontrolovaný, ale pravidelné kontroly a údržba sú skutočne dôležité počas celej životnosti konštrukcie. Tieto činnosti zabezpečujú kvalitu a predstavujú kľúčový faktor ovplyvňujúci životnosť konštrukcie [1]. Vyššie uvedené informácie nás však vedú k presvedčeniu, že pravidelné kontroly s riadnou údržbou, ktoré sú kľúčové pre trvalo udržateľný rozvoj infraštruktúry, by mali byť pre zodpovedných prioritou, no opak je často pravdou.

## 1. CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Účinky materiálovej degradácie vedú k redukcii mechanickej odolnosti konštrukcie, účinkov agresívneho prostredia na konštrukčnú oceľ je jeden z rozhodujúcich činiteľov pri určovaní zostatkovej životnosti jestvujúcich mostov. Hlavným cieľom dizertačnej práce je získať dáta o korózných úbytkoch konštrukčnej ocele vystavenej agresívnemu prostrediu (reálna atmosféra v Žilinskom kraji, alebo umelá v korózne komore), štatisticky spracovať a vyhodnotiť. Tieto údaje budú potom základom k návrhu konštrukcií na odolnosť.

### Tézy dizertačnej práce

1. Zhodnotenie súčasného stavu korózných modelov. Ich využitie a vplyv na odolnosť mostov.

2. Štatistické vyhodnotenie experimentálneho výskumu korózneho rýchlosti  $t_{corr}$  in-situ na mostoch a referenčných staniách.
3. Analýza zrýchlených korózných skúšok v korózne komore.
4. Vytvorenie korózneho modelu vhodného na použitie v mostnom staviteľstve.
5. Analýza vplyvu korózie na odolnosť prvkov oceľových mostov.

## **2. ANALÝZA AKTUÁLNEHO STAVU RIEŠENEJ PROBLEMATIKY**

Za základný ukazovateľ spoľahlivosti konštrukcie môžeme prijať pravdepodobnosť jej bezporuchového pôsobenia počas stanovenej doby prevádzky, t.j. pravdepodobnosť náhodného javu, že v priebehu stanovenej doby nevznikne ani jedna vážnejšia porucha – medzný stav, kedy musíme jej používanie obmedziť, prerušiť alebo ukončiť. Táto pravdepodobnosť sa zjednodušene nazýva spoľahlivosť a normatívne sa definuje ako všeobecná vlastnosť objektu plniť požadované funkcie pri zachovaní prevádzkových parametrov v daných medziach v požadovanom časovom úseku [4]. Spoľahlivosť tak predstavuje súhrnné označenie pre pojmy bezpečnosť, použiteľnosť, životnosť, hospodárnosť a udržateľnosť. Je to teda schopnosť systému zachovávať požadované vlastnosti počas vopred stanovenej doby technického života. Kvalitatívny význam jednotlivých pojmov súvisiacich so spoľahlivosťou je možné popísať nasledovne:

- *Bezpečnosť* je vlastnosť objektu neohrozovať ľudské zdravie alebo životné prostredie pri plnení predpísanej funkcie počas stanoveného času za stanovených podmienok. Tento pojem sa čiastočne prekrýva s pojmom bezporuchovosti.
- *Životnosť* stavebného objektu je schopnosť objektu plniť požadované funkcie do dosiahnutia medzného stavu pri stanovenom systéme predpísanej údržby a opráv

V súčasnej praxi sa používajú takmer výhradne podmienky spoľahlivosti odvodené z požiadaviek posúdenia tzv. medzných stavov, ktorých vznik je charakterizovaný prekročením určitých návrhových požiadaviek na úžitkové vlastnosti konštrukcie. V prípade oceľových konštrukcií sa medzné stavy únosnosti odvodzujú od lomov prvkov oceľových konštrukcií, ktoré vyvolávajú porušenie súdržnosti materiálu a následne deštrukciu prvku. Medzné stavy môžu byť vzťahované k trvalým, prechodným alebo mimoriadnym návrhovým situáciám. Všeobecne sa medzné stavy stavebných konštrukcií [5,6] delia na tieto skupiny:

- *Medzné stavy únosnosti*

Súvisia s porušením v dôsledky straty odolnosti konštrukcie ako celku alebo jej časti spôsobenej napr. porušením prierezu prekročením návrhovej pevnosti materiálu, vznikom krehkého lomu, porušením spoja, transformáciou na mechanizmus, stratou stability tvaru alebo polohy, únavou, dotvarovaním, alebo iným časovo závislým účinkom.

- *Medzné stavy použiteľnosti*

Súvisia s podmienkami, po ktorých prekročení nie sú splnené prevádzkové požiadavky na konštrukciu alebo jej časť, čo má za následok sťaženie bežného používania. Zahrňujú napr. nadmerné deformácie, posuvy a kmitanie zhoršujúce účinné využitie konštrukcie, ako aj iné poškodenia ovplyvňujúce vzhľad, trvanlivosť a funkciu objektu.

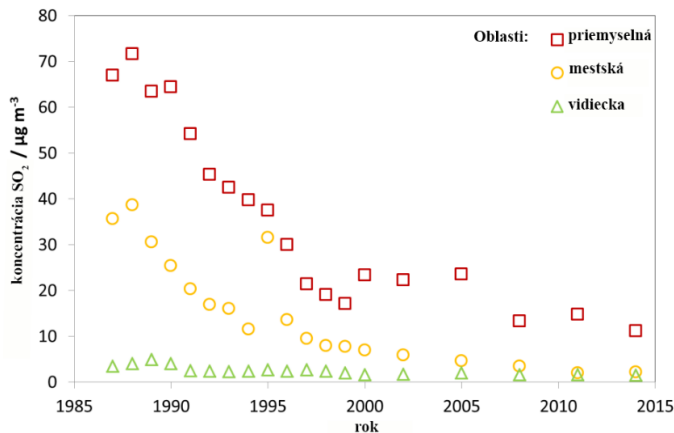
Mechanizmus vzniku medzných stavov je podmienený existenciou negatívnych vonkajších alebo vnútorných faktorov, ktoré sú vo svojej podstate náhodnými javmi. Z toho dôvodu je na ich vyšetrovanie potrebné aplikovať teóriu pravdepodobnosti a matematickej štatistiky. Za vonkajšie príčiny vzniku medzných stavov sa považujú účinky zaťaženia, vnútorné príčiny predstavujú vlastnosti materiálov, konštrukcií a ľudský činiteľ.

## 2.1 Agresivita prostredia a jej meranie

Zhoršenie kvality životného prostredia je celosvetový problém, ktorý významne ovplyvňuje použiteľnosť a trvanlivosť inžinierskych stavieb. Náklady na ich údržbu a rekonštrukciu narastajú kvôli neustále sa zvyšujúcej agresivite prostredia [10,11]. Z tohto dôvodu sa spustilo mnoho programov na sledovanie jednotlivých činiteľov [31].

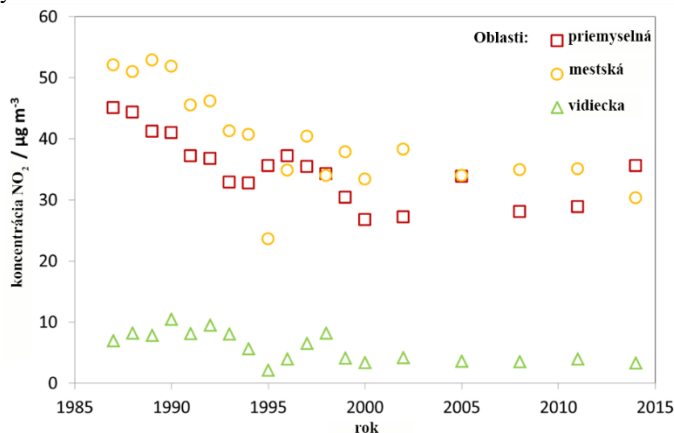
### 2.1.1 Činitele agresivity prostredia

Výsledky z medzinárodného programu ICP Materials [31] prinášajú informácie o jednotlivých faktoroch ako: SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, HNO<sub>3</sub> a PM<sub>10</sub>. Vďaka dlhjej dĺžke trvania výskumu, môžeme pozorovať zaujímavé trendy kvality ovzdušia. Výskum zachytáva vývoj znečistenia ovzdušia v rokoch 1987 až do roku 2014. Na nižšie uvedených obrázkoch je možné sledovať vývoj koncentrácie SO<sub>2</sub> a NO<sub>2</sub> v troch rozdielnych oblastiach a to v priemyselnej, mestskej a vidieckej. Koncentrácia SO<sub>2</sub> (Obrázok 2.1) v rokoch ma postupne klesajúcu



Obrázok 0.1 Priemerná koncentrácia SO<sub>2</sub> v priemyselných, mestských a vidieckych lokalitách za jednotlivé roky (1987–2014)[31].

Obrázok 2.2 ukazuje celkom odlišnú situáciu pre NO<sub>2</sub> v porovnaní s tým, že priemerná koncentrácia NO<sub>2</sub> sa od roku 1987 príliš nezmenila. Niektoré poklesy koncentrácií sa namerali približne do roku 2000, s malými zmenami, s výnimkou krátkodobého zvýšenia v priemyselných lokalitách.



Obrázok 0.2 Priemerná koncentrácia NO<sub>2</sub> v priemyselných, mestských a vidieckych lokalitách za jednotlivé roky (1987–2014)[31].

## 2.2 Korózne mapy v Európe

V rokoch 1.1.2002 – 30.4.2005 prebehol výskum v rámci projektu EU 5FP RTD, do ktorého boli zapojené krajiny ako Grécko, Poľsko, Ukrajina, Česká republika, Taliansko a iné [12], podobné projekty boli aj v [50]. Na základe tohto výskumu boli zriadené meracie stanice a tiež stojany zo vzorkami (Obrázok 2.4), na základe ktorých bol vypočítaný ročný korózný úbytok jednotlivých materiálov ako uhlíková ocel', vápenec, zinok, bronz a iné.

## 2.3 Modelovanie účinkov korózie na odolnosť konštrukcií

Súčasnú normovú metódu teórie spoľahlivosti overujú spoľahlivosť konštrukcií z hľadiska medzných stavov vyvolaných stálymi a premennými, resp. mimoriadnymi zaťažzeniami konštrukcií. Poruchy a poškodenia konštrukcií vyvolané environmentálnymi zaťažzeniami vplyvom agresivity prostredia a ich zmien počas návrhovej životnosti konštrukcie sú v posúdeniach zohľadnené nepriamo. Metodika overovania konštrukcií z hľadiska trvanlivosti nie je zatiaľ spracovaná pre praktické aplikácie, nakoľko nie sú dostatočne známe modely materiálovej degradácie. Preto sa trvanlivosť konštrukčných prvkov zabezpečuje voľbou vhodných materiálov odolných proti pôsobeniu prostredia, návrhom overených konštrukčných detailov minimalizujúcich vplyvy prostredia a umožňujúcich kontrolu a údržbu, zväčšovaním hrúbok prierezov, ako aj elimináciou vplyvov prostredia protikoróznou ochranou materiálov a konštrukcií.

Vytvorenie čisto teoretického modelu materiálových strát spôsobených koróziou je veľmi obtiažne, pretože fyzikálny mechanizmus tohto javu je veľmi komplexný. Z tohto




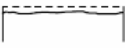

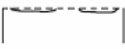
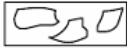
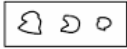
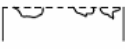
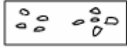
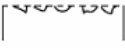
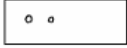
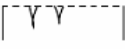
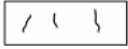
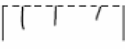
dôvodu je väčšina modelov korózie založená na určitých predpokladoch, alebo výsledkoch experimentálnych meraní. Odhady korózných strát v čase môžu byť získané in-situ viacerými spôsobmi. Tieto metódy sú užitočné najmä pre dlhodobejšie výskumné programy, pretože charakter účinkov korózie je premenný v čase. Pokiaľ sú pre daný prípad efekty degradačného mechanizmu známe kvalitatívne, potom môžeme k modelovaniu účinkov korózie pristúpiť cez extrapoláciu experimentálne získaných dát pomocou ktorých môžeme kalibrovať parametre matematického modelu.

### 3. TEORETICKÝ ZÁKLAD RIEŠENIA

#### 3.1 Korózia

Hoci v minulosti už bolo vyvinuté množstvo úsilia za cieľom pochopiť, predvídať a kontrolovať proces korózie, zatiaľ sa len relatívne málo výskumných projektov zaoberalo s kvantitatívnymi inžinierskymi modelmi potrebnými pre spoľahlivostnú analýzu konštrukcií. Dôsledkom toho je, že pre širokú škálu inžinierskych problémov kvantitatívne modelovanie účinkov korózie nie je príliš uspokojivé z pohľadu aplikácie pre účely inšpekcií a plánovanie údržby. Obzvlášť modelovanie priestorových aspektov malo len minimálnu pozornosť a zatiaľ v podstate nie je k dispozícii žiaden inžiniersky model takéhoto typu. V tejto časti je uvedený prehľad základných poznatkov o makroskopickom pôsobení korózie spolu s popisom charakteristík fyzikálneho procesu jej vzniku, rozvoja ako aj kvantifikácii dôsledkov jej pôsobenia.

#### Všeobecný popis poškodení zapríčinených koróziou

	Povrch materiálu	Priečny rez
Rovnomerná všeobecná korózia		
Nerovnomerná všeobecná korózia		
Rovnomerná lokalizovaná korózia		
Nerovnomerná lokalizovaná korózia		
Štrbiny s veľkou šírkou		
Štrbiny so strednou veľkosťou		
Úzke štrbiny s veľkou hĺbkou		
Korozívne pukliny		

Obrázok 3.3 Rôzne typy poškodení spôsobených koróziou

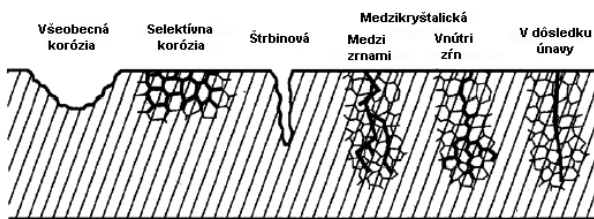
Geometrické charakteristiky korózie v danom bode v čase môžu byť popísané stochastickými charakteristikami priestorového náhodného poľa. Ak bude geometrický tvar účinkov korózie zjednodušene popísaný vo forme rovnomernej (všeobecnej) alebo lokalizovanej korózie, potom väčšina problémov degradácie koróziou, s ktorými sa reálne stretávame predstavujú kombináciu týchto dvoch foriem. Teda celková hĺbka korózneho úbytku v ľubovoľnom mieste  $x$  a v čase  $t$  môže byť popísaná súčtom účinkov týchto dvoch typov

$$d_C(x, t) = d_{UC}(t) + d_{LC}(x, t) \quad (3.1)$$

kde  $d_C(x, t)$  je celková hĺbka korózie v mieste  $x$  a v čase  $t$ ,  $d_{LC}(x, t)$  je hĺbka lokálneho korózneho poškodenia (v závislosti na  $x$ ) a  $d_{UC}(t)$  je hĺbka rovnomernej korózie. V nasledovnej tabuľke sú uvedené niektoré z rôznych typov korózie, ktoré môžu prakticky nastať, spolu s ich charakteristikou.

Korózia ocele zahŕňa komplex javov, ktoré sú vo všeobecnosti závislé od faktorov ako sú hustota znečistenia prostredia a materiálové charakteristiky. Na hodnotenie stupňa korózneho agresivity v partikulárnych atmosférických podmienkach bolo vyvinutých viacero metód. Vyhodnotenie parametrov okolitej atmosféry prostredníctvom kritérií uvedených v norme STN EN ISO 9223 [25], ktorá rozlišuje nasledovné formy korózie:

- rovnomernú,
- galvanickú,
- štrbinovú,
- bodovú,
- medzikryštalickú,
- selektívnu,
- erozívnu,
- korózne praskanie



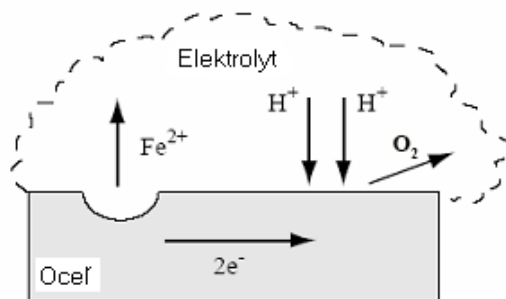
Obrázok 3.4 Typy korózných poškodení

Korózia ocele vo svojej podstate elektrochemický proces vyžadujúci prítomnosť elektrolytu pri určitej kritickej vlhкости, ktorá je závislá na hygroskopickojej povahe korózných produktov vo forme hydratovaného oxidu železitého, kedy sú molekuly železa transformované na rôzne typy hydroxidov. Proces môže byť rozdelený na katodickú a anodickú reakciu, pričom anodická oxidačná reakcia ovplyvňuje rozpúšťanie ocele v elektrolyte a katodická reakcia redukuje proces oxidácie je závislá na okolitom prostredí.

Atmosférická korózia postupne narastá v procese bilančnej rovnováhy medzi týmito reakciami, pričom dynamika tohto javu sa dá popísať vzťahom medzi elektrochemickým



potenciálom a polarizáciou prostredia. Treba poznamenať, že uvedené vzťahy predstavujú len hrubé vyjadrenie mechanizmov pôsobiacich v rôznych fázach procesu korózie, ktoré závisia na rôznych faktoroch ako je chemické zloženie prostredia a kovu, hodnota pH prostredia a teplota. Ak je korózia vo svojej podstate elektrický okruh s prúdom elektrónov medzi anodickými a katodickými oblasťami, potom taktiež vyžaduje vonkajší vodivý roztok (elektrolyt) v ktorom sú anóda aj katóda ponorené. Najbežnejším elektrolytom býva voda. Rozličné kroky korózneho procesu sú ilustrované na Obrázok 3.3 Rovnomerná korózia je charakterizovaná skutočnosťou, že elektrochemické reakcie prebiehajú na povrchu rovnomerne, pričom sa nedajú identifikovať také makroskopické oblasti, ktoré sú čisto anodické alebo katodické.



Obrázok 3.5 Zjednodušená schéma fyzikálneho mechanizmu procesu korózie ocele

### 3.2 Klasifikácia koróznej agresivity

Klasifikácia koróznej agresivity atmosfér sa musí robiť buď stanovením koróznej agresivity založeným na meraní koróznej rýchlosti na štandardných vzorkách, alebo odhadom koróznej agresivity založeným na informáciách o prostredí. Obe metódy vyhodnotenia koróznej agresivity predstavujú zovšeobecnený prístup a sú charakterizované určitými neistotami a obmedzeniami.

Tabuľka 3.1 Stupne koróznej agresivity

Stupeň	Korózna agresivita
C1	Veľmi nízka
C2	Nízka
C3	Stredná
C4	Vysoká
C5	Veľmi vysoká
CX	Extrémna

Korózne rýchlosti počas prvého roku pri meraní koróznej rýchlosti štandardných vzoriek sú uvedené v Tab. 3.2. Tieto hodnoty sa nemôžu extrapolovať na dlhodobjšie obdobie, informácie ohľadne dlhodobého korózneho správania jednotlivých materiálov sú uvedené v STN EN ISO 9224 [26].

## 4. EXPERIMENTÁLNE MERANIE KORÓZNYCH ÚBYTKOV IN-SITU

Reálne mostné konštrukcie sú ovplyvnené podmienkami prostredia. Environmentálne vplyvy v čase spôsobujú degradáciu prvkov mosta, čo vedie k zmenšovaniu prierezovej plochy, alebo inak povedané výrazne ovplyvňuje bezpečnosť konštrukcie [6,7]. Sledovanie procesu koróznej degradácie v priebehu času na existujúcich mostných konštrukciách je náročné a musí spĺňať viacero normových podmienok.

### 4.1 Vzorky na meranie korózných úbytkov in-situ

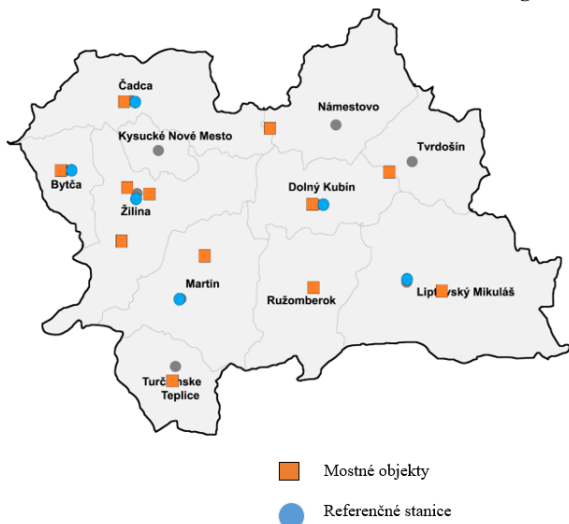
Určovanie koróznej rýchlosti  $r_{\text{corr}}$  bolo podľa normy [25,29,30] na skúšobných vzorkách s rozmermi 150x100x3 mm s chemickým zložením a s charakteristikami podľa tabuľky 4.1. Tieto vzorky boli odvážené, boli zmerané ich rozmery a taktiež sa vyhodnotila hustota. Osadenie vzoriek podliehalo normovým požiadavkám, ktoré boli splnené:

- povrch vzoriek bol pred osadením odmastený
- počet vzoriek bol tri pre každý časový interval expozície
- uhol vzoriek je 45° od horizontály
- jednotlivé vzorky by sa nemali navzájom ovplyvňovať napríklad kvapkajúcou vodou
- začiatok skúšky sa odporúča v období najvyššej koróziivnosti (jeseň alebo jar), v našom prípade boli vzorky osadené pred koncom leta (mosty) a na začiatku jari (referenčné stanice)

*Tabuľka 4.2 Údaje o použitej konštrukčnej oceli*

Oceľ	Norma	Medza klzu	Medza pevnosti	Ťažnosť	CEV									
S355J2	STN EN 10025-2	442 MPa	587 MPa	26,2 %	0,44 %									
Chemické zloženie [%]														
Fe	C	Si	P	S	Cr	Cu	Ni	Mn	N	Mo	Al	Nb	As	Sn
	0,190	0,025	0,010	0,005	0,050	0,050	0,030	1,400	0,003	0,010	0,059	0,010	0,004	0,030

Čistenie vzoriek je možné dvoma spôsobmi, buď pripravením chemického roztoku podľa normy [30], čo by však znamenalo znehodnotenie vzorky pre ďalšie merania. Alebo mechanický, to znamená, že vzorky boli brúsením zbavené korózných produktov.



Obrázok 4.6 Umiestnenie vzoriek v Žilinskom samosprávnom kraji

Oranžovou farbou sú vyznačené vybrané mostne objekty a modrou sú zas označené referenčné stanice. Meraním korozných úbytkov na referenčných staniaciach sa snažíme odseparovať účinky premávky a zimnej údržby na mostných objektoch na degradáciu konštrukčnej ocele.

Pri výbere mostných objektov sme sa snažili jednak rovnomerne pokryť územie Žilinského samosprávneho kraja, no zároveň vybrať zastúpenie mostov z rôznych materiálov (ocelový, betónový, spriahnutý ocelobetónový), z rôznych typov konštrukcií (komorový, trámový, priehradový) a rozlične druhy prekážok (ponad cestu, železniciu, rieku). Zvolili sa mosty na cestných komunikáciách (rýchlostná cesta, cesty I., II. a III. triedy) a železničných tratiach, tabuľka 4.2. Umiestnenie samotných vzoriek na konštrukcii mostného objektu bolo prispôbené dispozícií, tak aby bol k vzorkám relatívne jednoduchý prístup pomocou rebríka, no zároveň boli chránene pred poškodením či krádežou Obrázok 4.2. Osadenie vzoriek na mosty prebehlo koncom leta v roku 2016.



Obrázok 4.7 Umiestnenie vzoriek na moste

Umiestnenie vzoriek na referenčne stanice, Obrázok 4.3, prinieslo so sebou niekoľko výziev. Bolo potrebné vyrobiť stanicu/ stojan na vzorky, aby boli umiestnené v dostatočnej výške nad terénom, zároveň ho vyrobiť z nehrdzavejúceho materiálu, aby prípadná korózia samotného stojana neovplyvnila výsledky. Taktiež bolo potrebné zabezpečiť, aby sklon osadených vzoriek bol 45° a kontaktná plocha bola čo najmenšia. Lokalitu referenčných staníc sme sa snažili priblížiť vzorkám osadených na mostoch. Aby boli vzorky bezpečne umiestnené rozhodli sme sa pre spoluprácu so Správou ciest Žilinského samosprávneho kraja v jednotlivých mestách.

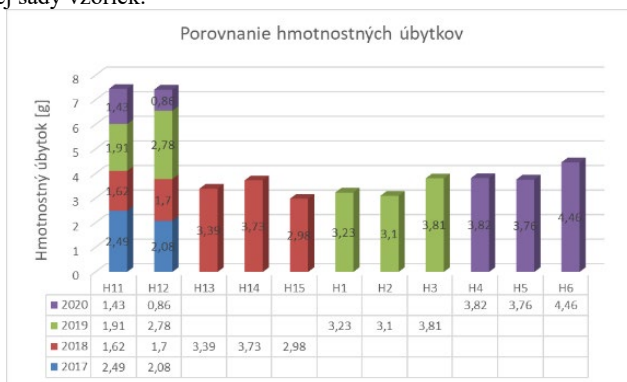


Obrázok 4.8 Umiestnenie vzoriek na referenčnej stanici

## 4.2 Experimentálne meranie korózných úbytkov na mostných objektoch

### 4.2.1 Bytča

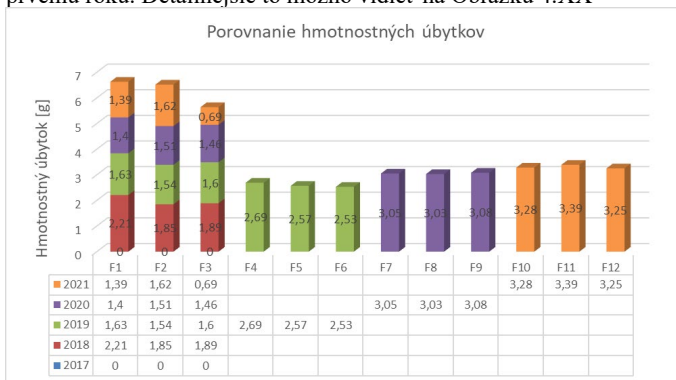
Vzorky boli umiestnené na priečnik pri podpere cestného mostu, ktorého konštrukcia bola oceľový oblúk a prekonával vodnú prekážku (Hričovský Kanál Váhu). Grafické vyhodnotenie hmotnostných úbytkov je na Obrázku 4.4, prvá sada vzoriek bola čistená opakovane po každom roku expozície (H11, H12 – 2017-2020), nasledujúce sady vzoriek boli postupne odoberané v ďalších rokoch (H13, H14, H15 – 2018; H1, H2, H3 – 2019 a H4, H5, H6 – 2020). Z nameraných údajov je možné vidieť výrazný vplyv opätovného brúsenia prvej sady vzoriek.



Obrázok 4.9 Hmotnostné úbytky po štyroch rokoch z mostu v Bytči

### 4.2.2 Čadca

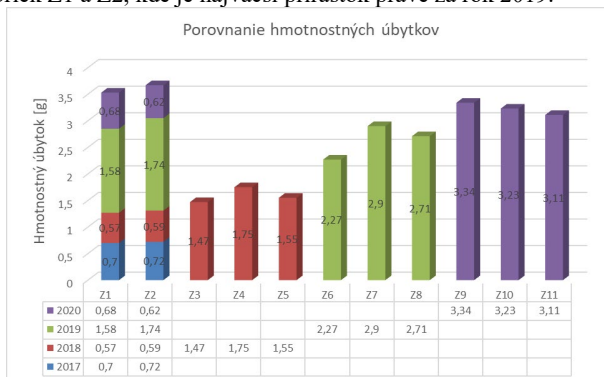
Osadenie vzoriek na tento betónový trámový most, ktorý je na ceste I. triedy ponad rieku Kysuca prebehlo o rok neskôr oproti zvyšným mostom a teda v roku 2017. Rovnako ako v predošlom prípade môžeme sledovať výrazný účinok opakovaného brúsenia vzoriek. Na Obrázku 4.5 je taktiež vidieť pomalé zväčšovanie úbytkov na vzorkách F4 až F12 oproti prvému roku. Detailnejšie to možno vidieť na Obrázku 4.XX



Obrázok 4.10 Hmotnostné úbytky po štyroch rokoch z mostu v Čadci

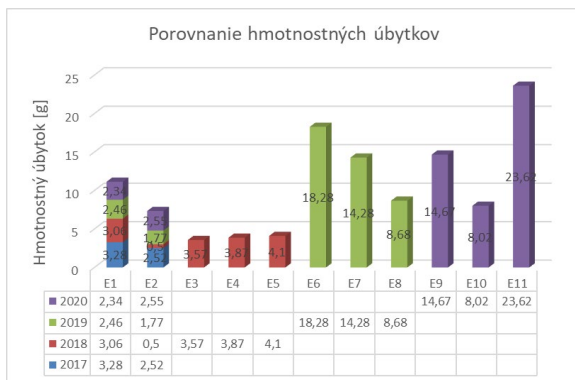
### 4.2.3 Oravský Podzámok

Železničný ocelový trámový most ponad železničnú vlečku, ktorá slúži ako prístup k výrobnému závodu priniesol už menší rozdiel po štyroch rokoch medzi vzorkami brúsenými len jedenkrát a tými opakovane čistenými. Taktiež sa tu dá odsledovať nárast hmotnostného úbytku medzi rokmi 2018 a 2019, Obrázok 4.6. Značný skok hmotnostného úbytku medzi vzorkami Z3-Z6 a sadou Z7-Z9 je viditeľný aj vďaka opätovnému brúseniu prvej sady vzoriek Z1 a Z2, kde je najväčší prírastok práve za rok 2019.



Obrázok 4.11 Hmotnostné úbytky po štyroch rokoch z mostu v Oravskom Podzámku

#### 4.2.4 Hybe



Obrázok 4.12 Hmotnostné úbytky po štyroch rokoch z mostu v Hybe

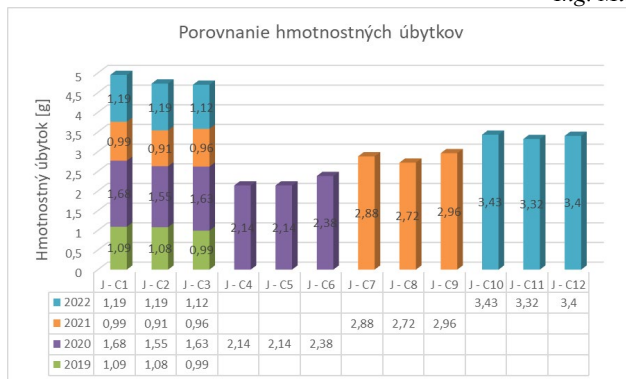
V úvode sa spomínalo, ako veľmi je dôležitá údržba a pravidelná kontrola mostných objektov, bez ktorej ani pri najlepšom projekčnom návrhu a bezchybnej výstavbe nie je možné pre konštrukciu mosta splniť 100 ročnú návrhovú životnosť. Pri cestnom komorovom moste ponad diaľnicu D1 bola však údržba zanedbaná, čo viedlo k problémom s odvodnením. Nesprávne fungujúce odvodnenie zapríčinilo znehodnotenie vzoriek po druhom roku výskumu, nakoľko sa k niektorým vzorkám uložených na opore dostávala voda z cestnej komunikácie na moste.

### 4.3 Experimentálne meranie korózných úbytkov na referenčných staniách

Mosty ako súčasť dopravnej infraštruktúry musia odolávať nielen atmosférickým vplyvom, ale tak isto aj účinkom od dopravy a zimnej údržby ciest. Tieto údaje sú však komplexné a nepoukazujú na to, ktorý faktor ma väčší vplyv. Na ich separáciu boli použité merania na referenčných staniách (Obrázok 4.13), kde boli vzorky konštrukčnej ocele počas jedného roka vystavené agresivite prostredia. Stanice boli rozmiestnené na území Žilinského samosprávneho kraja, a to v mestách, kde tiež prebieha sledovanie korózných úbytkov na mostných objektoch.

#### 4.3.3 Dolný Kubín

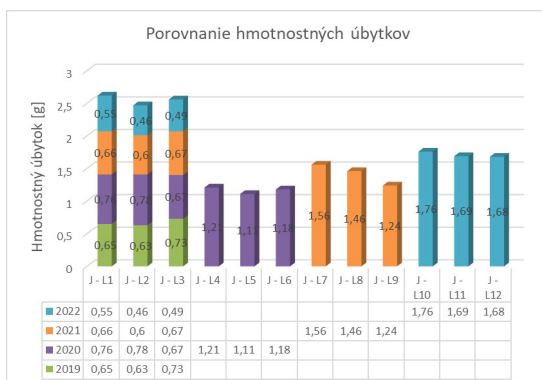
Priebeh degradácie v čase opäť vykazuje rovnaké známky, repetitívne čistenie prvej sady vzoriek s výrazným hmotnostným úbytkom nasledujúc postupne menším koróznym napadnutím.



Obrázok 4.813 Hmotnostné úbytky po štyroch rokoch z referenčnej stanice v Dolnom Kubíne

#### 4.3.4 Liptovský Mikuláš

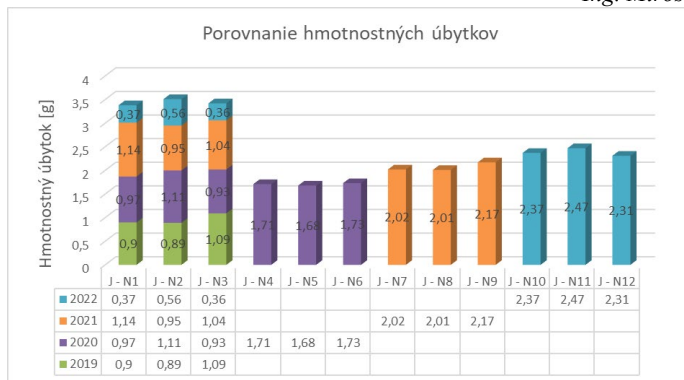
Úmernosť úbytkov zostáva podobná ako pri predošlých stanicach, až na celkovo nižší hmotnostný úbytok. V porovnaní so stanicami v Dolnom Kubíne, či v Bytči je degradácia o približne 50% menšia.



Obrázok 4.9 Hmotnostné úbytky po štyroch rokoch z referenčnej stanice v Liptovskom Mikuláši

#### 4.3.5 Martin

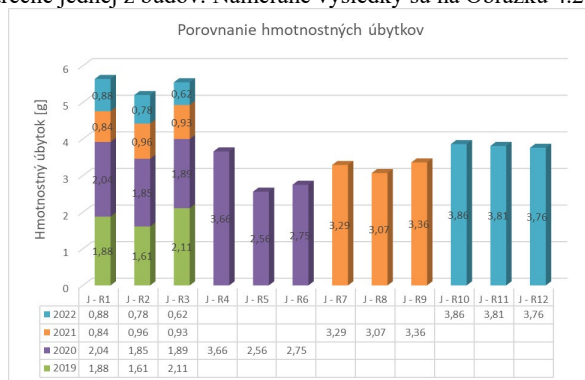
V poslednom meraní roku expozície 2022 sa zaznamenali na referenčnej stanici v Martine len zanedbateľné úbytky hmotnosti. Okrem tejto skutočnosti je tu podobnosť s predošlými stanicami.



Obrázok 4.10 Hmotnostné úbytky po štyroch rokoch z referenčnej stanice v Martine

### 4.3.6 Žilina

Táto jediná referenčná stanica sa nachádza v areáli Žilinskej univerzity v Žiline, konkrétne na streche jednej z budov. Namerané výsledky sú na Obrázku 4.20.



Obrázok 4.1114 Hmotnostné úbytky po štyroch rokoch z referenčnej stanice v Žiline

## 4.4 Porovnanie hmotnostných úbytkov na mostoch a staniach

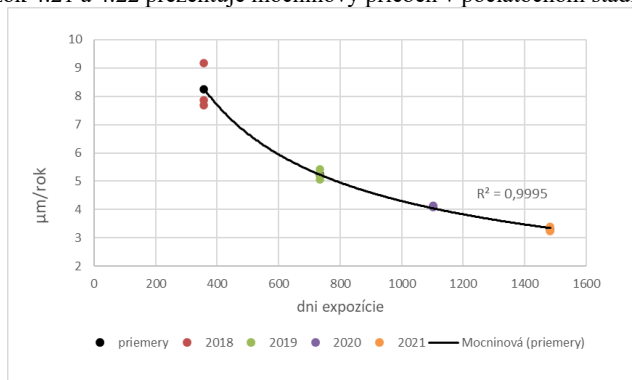
Je zjavné, že aj experimentálne merania koróznych úbytkoch majú svoj význam. Pri vyhodnocovaní nameraných údajov in-situ by bolo treba oveľa viac dát. Mapovania koróznych úbytkov a korózne agresivity in-situ sa javí ako efektívne z pohľadu hodnotenia správania sa kovových materiálov a ich povrchových úprav. Ani detailné mapové spracovanie však nepostihuje lokálne faktory, vyplývajúce z konštrukčného riešenia konštrukcií alebo ich diskretných prvkov. Predovšetkým v prípade rozmernejších stavieb, akými sú aj mosty, sa javí práve pozícia v konštrukcii ako jeden z rozhodujúcich vplyvov pre postup a šírenie korózie, [44,45].

Tak ako na vzorkách osadených na mostoch, tak aj na tých z referenčných staníc sa vo väčšine prípadov potvrdilo očakávané. A to že hĺbka korózneho napadnutia v  $\mu\text{m}/\text{rok}$



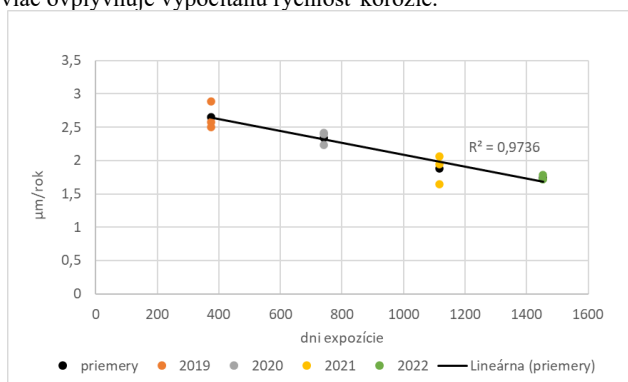
na vzorkách osadených na mostoch je výrazne väčšia u tých, ktoré boli opätovne čistené v porovnaní s tými, ktoré boli vystavené účinkom atmosféry rovnaký čas bez zásahu. Potvrďuje sa tak známy fakt, že po začiatočnom štádiu vzniku korózie je postup tohto procesu spomalený práve vrstvou korózných spodín na povrchu kovu, nakoľko táto vrstva chráni materiál pred ďalšou rýchlou degradáciou. Opätovným čistením vzoriek sa táto ochrana vrstva odstráni a priebeh korózie bol výraznejší.

Ďalším zaujímavým faktom je priebeh koróznej rýchlosti v čase. Keď sa naň pozrieme detailnejšie je na vybraných mostných objektoch vidieť rýchlejší nárast koróznej hĺbky, Obrázok 4.21 a 4.22 prezentuje mocninový priebeh v počiatočnom štádiu.



Obrázok 4.1215 Priebeh koróznej rýchlosti  $r_{corr}$  na vzorkách z mostu v Čadci

Na druhej strane pri referenčných stanicích je priebeh lineárny, Obrázok 4.23. Toto rozdielne správanie sa v počiatočných rokoch môže byť ovplyvnené rôznymi faktormi. Jedným z najhlavnejších, ako sa aj ukázalo v [46], kde sa vykonala citlivosťná analýza chloridov v blízkosti dopravy od posypových soli s výsledkom, že vysoká depozícia chloridov najviac ovplyvňuje vypočítanú rýchlosť korózie.

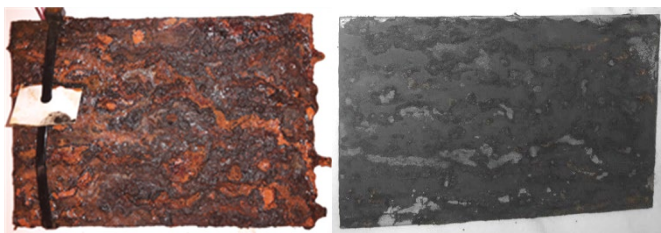


Obrázok 4.1316 Priebeh koróznej rýchlosti  $r_{corr}$  na vzorkách z referenčnej stanice z L. Mikuláša

#### **4.5 Experimentálne meranie koróznych úbytkov v koróznej komore**

Na výskumu korózie zrýchlenými skúškami soľnou hmlou v koróznej komore bolo použitých 30 kusov konštrukčnej ocele, totožnej so vzorkami umiestnenými na mostoch a referenčných staniách [27].

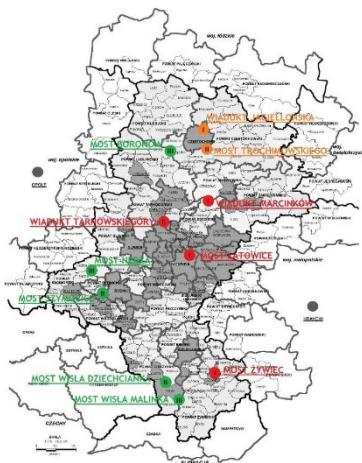
Experimentálne merania korózneho úbytku boli realizované na vzorkách v skúšobnej koróznej komore metódou zrýchlenej skúšky korózie v hmle neutrálneho roztoku chloridu sodného (Neutral Salt Spray test = NSS-test). Vonkajšie prostredie bolo v komore simulované soľnou hmlou s koncentráciou 5% NaCl, ktorý predstavuje koncentráciu 50 g/l, pričom v komore sa udržiava teplota  $35\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Takéto prostredie simuluje podmienky, v ktorých štandardne jednému roku vonkajšej exploatacie odpovedá zvyčajne niekoľko dňový časový úsek v komore, v závislosti od triedy korózneho prostredia [28].



*Obrázok 4.14 Vzorka po skúške v koróznej komore a po následnom očistení [27]*

#### **4.6 Experimentálne meranie koróznych úbytkov v Poľsku**

Na základe vyhodnotenia koncentrácie látok znečisťujúcich ovzdušie bol na meranie koróznych úbytkov zvolený Sliezsky región. Ten vykazoval oproti iným oblastiam v Poľsku väčšiu agresivitu prostredia. Autori v publikáciách [13,14] opísali priebeh zisťovania údajov o koróznych úbytkoch nasledovne.

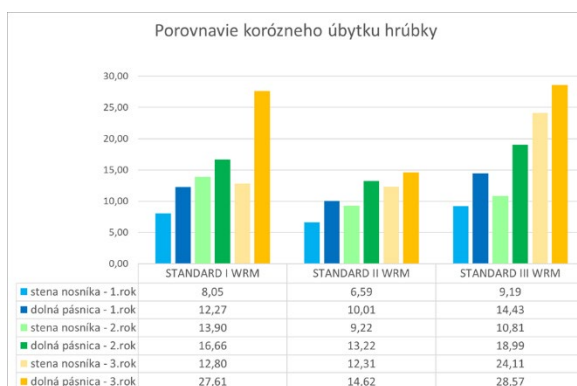


*Obrázok 4.1517 Skúmané mosty v Sliezskom kraji [14]*

Mosty, na ktorých sú umiestnené vzorky boli vybrané tak, aby pokryli celý kraj a zároveň boli vo všetkých triedach zimnej údržby (WRM I – WRM III). Čím sa sleduje aký ma dopad väčšie alebo menšie množstvo posypových látok pri zimnej údržbe ciest.

Na každý vybraný mostný objekt bolo umiestnených 24 normových vzoriek konštrukčnej ocele s rozmermi 150x100x2 mm. Ako je na Obrázku 4.28 je možné vidieť 12 vzoriek bolo umiestnených na stenu nosníka a ďalších 12 vzoriek bolo umiestnených na hornej hrane spodnej pásnice, aby sa mohli skúmať rozdielne účinky korózie v zvislom a horizontálnom smere.

Okrem mostov, kde sa očakáva vyššia degradácia z dôvodu prevádzky a údržby, boli umiestnené aj referenčné vzorky na skúšobné stanice v rámci kraja. Vďaka týmto výsledkom by malo byť možné určiť aký vplyv na koróziu konštrukčnej ocele ma agresivita prostredia a koľko navyše pridá prevádzka a údržba mostnej konštrukcie.



Obrázok 4.16 Hmotnostné úbytky v  $\mu\text{m}$  po troch rokoch expozície na mostoch v troch triedach zimnej údržby

Výskumné aktivity v Sliezskej regióne prebiehali v rámci spolupráce s kolegami z Technickej univerzity v Čestochovej (Częstochowa University of Technology / Politechnika Częstochowska)

## 5. APLIKÁCIA ÚČINKOV KORÓZIE NA NITOVANÉ PRIEREZY OCEĽOVÝCH MOSTOV

Na základe experimentálnych meraní vieme zistiť hodnotu hmotnostného úbytku konštrukčnej ocele. V prípade jednoročnej expozície vzorky vieme na základe úbytku hrúbky určiť aj stupeň agresivity prostredia. Avšak aplikácia týchto údajov s jestvujúcimi teoretickými koróznymi modelmi je pre bežnú inžiniersku prax komplikované a hlavne časovo náročná. Ako sa spomenulo v úvode, súčasný stav ocelových mostov nie je priaznivý a ich značná časť je v blízkosti návrhovej životnosti. Preto sme sa zamerali na vytvorenie praktického riešenia – aplikácie, ktorá by jednak slúžila na analýzu odolnosti

ocelových prvkov a zároveň bola jednoduchou náhradou komplikovaných korózných modelov pre inžiniersku prax.

### 5.1 Výpočet exponenta „b“

Korózna rýchlosť kovov a zliatin vystavených vonkajšej atmosfére nie je v čase konštantná, ale po počiatočnej fáze usadenia korózných produktov na povrchu klesá.

Rovnica (5.1) charakterizuje účinok korózie v počiatočných približne 20 rokoch exploatacie. Pre dlhšie trvajúcu expozíciu sa na popis korózneho napadnutia využije upravený vzťah (5.2).

$$D'_{t \leq 20 r} = r'_{\text{corr}} \cdot t^b \quad (5.1)$$

$$D'_{t > 20 r} = r'_{\text{corr}} \left[ 20^b + b \cdot 20^{b-1} (t - 20) \right] \quad (5.2)$$

V rovnici (5.2) je  $D'$  je celkové korózne napadnutie v  $\mu\text{m}$ ,  $r'_{\text{corr}}$  je korózna rýchlosť v  $\mu\text{m}/\text{rok}$ , symbol  $t$  charakterizuje čas v rokoch. Bezrozmerný exponent  $b$  je definovaný ako koeficient kov-prostredie-špecifický čas. Nakoľko je známe zloženie ocele stanovil sa metodikou z [33], ktorá je všeobecne akceptovaná a je aj súčasťou prílohovej časti normy [32]. Z hmotnostných zlomkov  $w_i$  rozhodujúcich legujúcich prvkov C, P, S, Si, Ni, Cr a Cu uvedených v tabuľkách 4.1 a 5.1 sa dá výsledný súčiniteľ  $b$  stanoviť podľa (5.3) so zohľadniam parciálnych súčiniteľov legujúcich prvkov  $b_i$  uvedených v [32]. Nakoľko ide v ďalšom o približné porovnanie priemerných hodnôt nepočítalo sa so žiadnou odchýlkou či prirážkou k tejto hodnote.

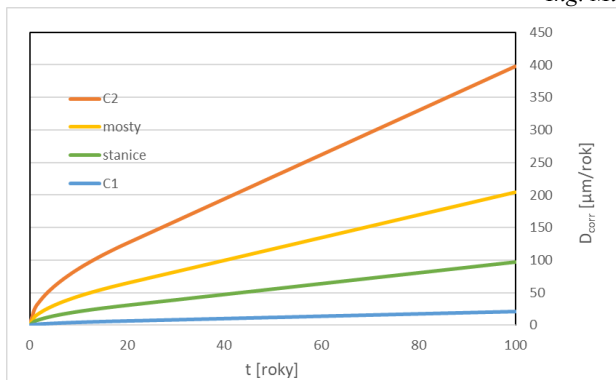
Tabuľka 5.3 Koeficienty legujúceho prvku

Prvok	koeficient $b_i$
C	-0,084
P	-0,49
S	1,44
Si	-0,163
Ni	-0,066
Cr	-0,124
Cu	-0,069

$$b = b_a = 0,569 + \sum (b_i \cdot w_i) = 0,5252 \quad (5.3)$$

Následne po vypočítaní koeficientu „b“ a dosadení korózneho rýchlosti  $r_{\text{corr}}$  pre jednotlivé triedy agresivity prostredia C1-CX sa vykreslil ich priebeh v čase 100 rokov na základe rovníc 5.1 a 5.2 podľa toho či sa jednalo o dobu trvania do 20 rokov, alebo nad 20 rokov.

Po vypočítaní priebehu korózných úbytkov pre triedy prostredia C1-CX sa dosadili namerané hodnoty z experimentálnych meraní in-situ a to z mostných objektov a aj z referenčných staníc.



Obrázok 5.1 Priebeh koróznych úbytkov z mostov a referenčných staníc ohraničený triedami prostredia C1 a C2 s vypočítaným koeficientom "b"

Z Obrázku 5.2 je zrejme, že hodnoty koróznej rýchlosti  $r_{corr}$  získane zo vzoriek osadených na mostných objektoch a referenčných staniaciach sa nachádzajú v rozmedzí tried C1 – veľmi nízka a C2 nízka.

## 5.2 Vytvorenie aplikácie pre výpočet vplyvu korózie na nitované prierezy

Podľa výročnej správy Železníc Slovenskej republiky [3] je vlastná investícia do modernizácie a rozvoja železničnej infraštruktúry len na úrovni 222 tisíc eur. Vzhľadom na to že z celkového počtu 2326 mostných objektov je veľká časť starších a je potrebné poznať ich zvyškovú odolnosť rozhodli sme sa venovať prvkom ocelových nitovaných mostov [52, 53].

Na rozdiel od zváraných profilov je výpočet prierezových charakteristík nitovaného prvku náročnejší, preto sa pri tvorbe programu na výpočet pracovalo v krokoch a postupne sa dopĺňali rozšírene možnosti výpočtu. Funkcionalita sa naďalej upravuje, aby bolo možné vypočítať potrebné veličiny v čo najkratšom čase v „user-friendly“ prostredí.

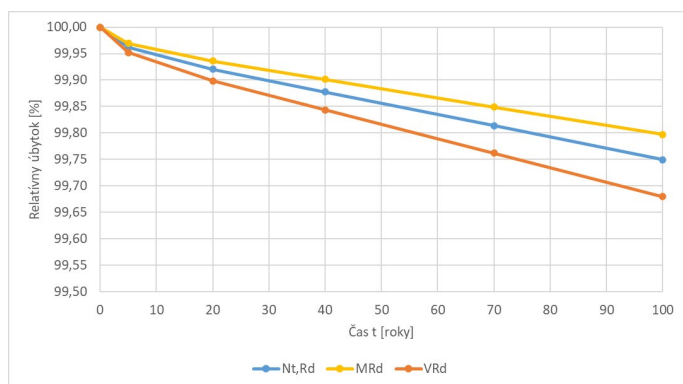
Aktuálne možnosti výpočtu

- Nitovaný prierez je rozdelený na malé dieliky, aby bolo možné urobiť jednoduchý výpočet prierezových charakteristík
- Plná voliteľnosť rozmerov (pásnica, stena, L profil, nity)
- Aplikovateľnosť korózneho napadnutia premenného po priereze (rozdielna korózia hornej a spodnej pásnice, či rozdielna degradácia po výške steny)
- Výpočet koeficientu „b“ kov-prostredie-špecifický čas
- Výpočet koróznych úbytkov  $D_{corr}$  v čase na základe hodnoty úbytku po ročnej expozičii
- Výpočet kompletných prierezových charakteristík (plný prierez, prierez oslabený o nity v ťahanej časti, alebo prierez oslabený o všetky nity)
- Výpočet návrhovej odolnosti prierezu na ťah, ohyb a šmyk
- Model odolnosti prierezu v čase

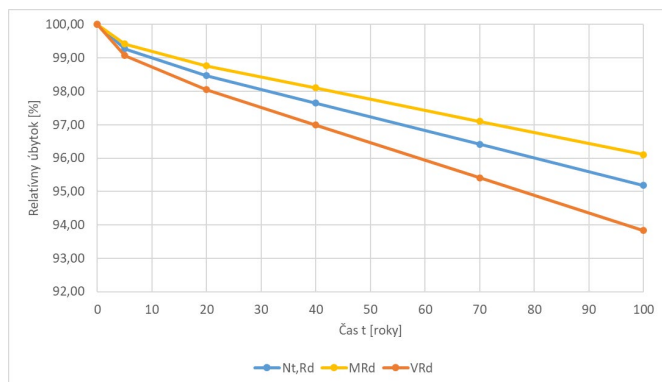
Pre kontrolu správnosti výpočtu sa použil program SCIA Engineer, kde sa vytvorili totožné prierezy na výpočet prierezových charakteristík.

### 5.3 Aplikácia koróznych rýchlostí $r_{\text{corr}}$ tried prostredia C1 a C2 vo výpočte odolnosti v čase

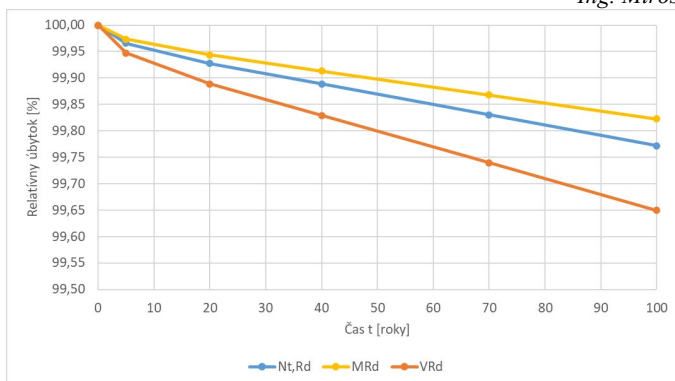
Vďaka predošlým krokom, kde sa najskôr určil koeficient kov-prostredie-špecifický čas a následne sa vďaka dosadeniu koróznej rýchlosti  $r_{\text{corr}}$  do vzorcov 5.1 a 5.2 získal priebeh úbytkov v čase vieme po zvolení ľubovoľného prierezu vo výpočtovom modeli získať priebeh odolnosti v čase. Aplikácia je navrhnutá tak, aby bolo možné vypočítať prierezové charakteristiky a návrhové odolnosti pre základne prvky nitovaných oceľových mostov ako pozdĺžnik, priečnik, či hlavný nosník. Na obrázkoch 5.5 až 5.8 sú ukážky vypočítaného relatívneho úbytku odolnosti v čase pre pozdĺžnik a priečnik s hodnotami  $r_{\text{corr}} = 1,3 \mu\text{m/rok}$  pre C1 a  $r_{\text{corr}} = 25 \mu\text{m/rok}$  pre C2.



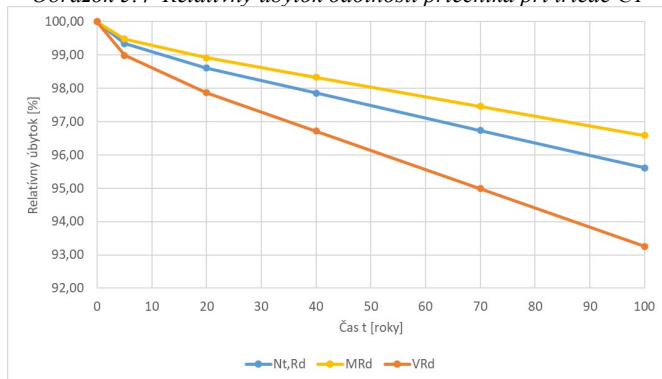
Obrázok 5.2 Relatívny úbytok odolnosti pozdĺžnika pri triede C1



Obrázok 5.3 Relatívny úbytok odolnosti pozdĺžnika pri triede C2



Obrázok 5.4 Relatívny úbytok odolnosti priečnika pri triede C1

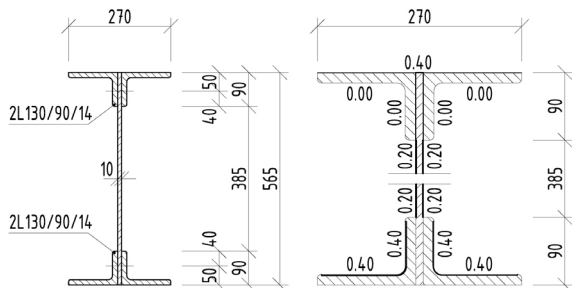


Obrázok 5.5 Relatívny úbytok odolnosti priečnika pri triede C2

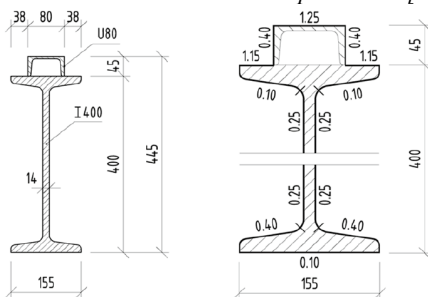
Výpočtová aplikácia umožňuje voľbu ľubovoľného typu prvku, jeho rozmerov, hrúbku korózneho napadnutia, ale aj rôzny priebeh degradácie materiálu v rámci priečného rezu prvku.

#### 5.4 Analýza pomeru korózneho úbytku po priereze prvku

Na katedre sa nerobí len teoretický výskum, ale aj diagnostiky, prepočty a zaťažovacie skúšky mostných objektov [11, 34, 35, 39, 40]. Vďaka dlhoročným praktickým skúsenostiam disponujeme množstvom dát o reálnych konštrukciách, z ktorých vieme že priebeh degradácie po priečnom reze prvku nie je konštantný. V nasledujúcich obrázkoch sú graficky znázornené dáta o korózii na prvkoch ocelových mostov z realizovaných diagnostik.



Obrázok 5.6 Priebeh korózie na pozdĺžniku [34]

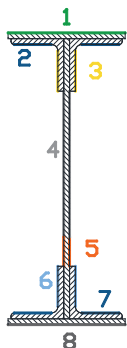


Obrázok 5.7 Priebeh korózie na pozdĺžniku [35]

Tabuľka 5.2 Definované pomery degradácie

oblasť korózie	popis	pomer A	pomer B	pomer C
1	horný plech hore	3	4	2
2	horné L vodorovne	1	0,5	0,5
3	horné L zvislo	1	1	1
4	2x vrchná časť steny	1	1	1
5	2x spodná časť steny	8	1	5
6	dolné L zvislo	1	1	5
7	dolné L vodorovne	3	2,5	5
8	dolný plech dole	2	0,5	0,5



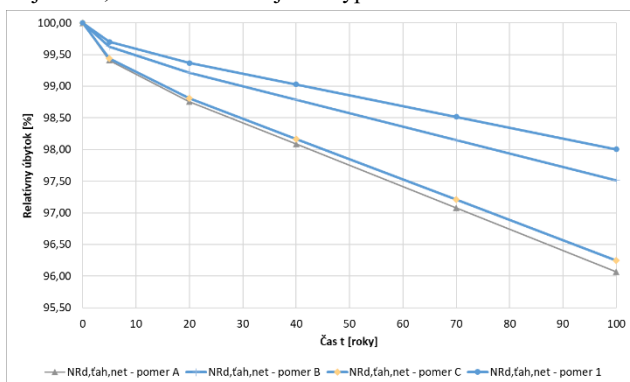


Obrázok 5.818 Schéma degradácie po priereze

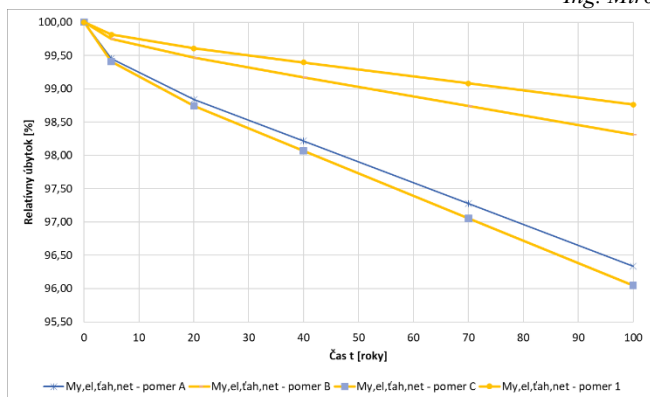
Hodnotenie existujúcich konštrukcií a sledovanie vplyvu korózie na odolnosť prvkov nie je skúmané len na Slovensku [41, 42, 47], ale aj v zahraničí [36, 37, 38, 43]. Veľké množstvo rozličných meraní prináša však podobný záver a to, že priebeh korózie ocelových I profilov vystavených agresívnej atmosfére je premenlivý po priereze, ale s určitou formou pomeru medzi jednotlivými časťami. Práve preto bol výpočtový model vytvorený tak, aby bolo možné zadať rozdielne úbytky hrúbky v pomere jednotlivých častí.

### 5.5 Aplikácia degradačných pomerov na hodnotách korózneho úbytku z mostných objektov

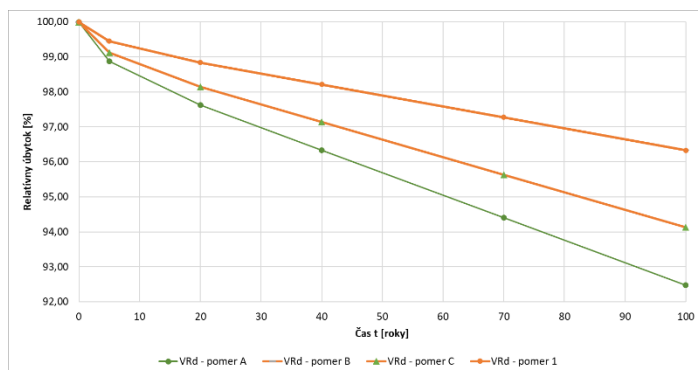
Posledným krokom je aplikácia reálnych hodnôt korózneho úbytku do modelu odolnosti. Týmto sa prepája experimentálne meranie, kedy postačuje mať hodnotu  $r_{corr}$  po prvom roku (prípadne vypočítanú cez funkciu dose-response, alebo inak povedané dávka-odzva) s modelom na výpočet odolnosti nitovaného prvku. Avšak ako bolo už spomenuté v časti 4.5 celkový priebeh korozívneho napadnutia závisí od viacerých faktorov, ako napríklad poloha prvku v rámci konštrukcie [44,45]. Preto treba posúdiť relevantnosť nameraných údajov  $r_{corr}$ , ktoré sa dosadzujú do výpočtového modelu.



Obrázok 5.9 Relatívny úbytok odolnosti v ťahu hlavného nosníka v poli



Obrázok 5.10 Relatívny úbytok odolnosti v ohybe hlavného nosníka v poli



Obrázok 5.1119 Relatívny úbytok odolnosti v šmyku hlavného nosníka v poli

## 6. ZÁVERY, VEDECKÝ PRÍNOS A ODPORÚČANIA PRE PRAX

### 6.1 Závery

Najväčší vplyv na priebeh korózie konštrukčnej ocele má práve prostredie, v ktorom sa stavba nachádza. Poznatky o agresivite konkrétneho prostredia sú pre prax dôležité, preto má zber dát korózných úbytkov zo vzoriek osadených v reálnom prostredí má veľký význam. Mapovania korózných úbytkov a korózneho agresivity in-situ sa javí ako efektívne z pohľadu hodnotenia správania sa kovových materiálov a ich povrchových úprav. Ani detailné spracovanie však nepostihuje lokálne faktory, vyplývajúce z konštrukčného riešenia konštrukcií. Predovšetkým v prípade rozmernejších stavieb, akými sú aj mosty, sa javí práve pozícia v konštrukcii ako jeden z rozhodujúc vplyvov pre postup a šírenie korózie.

Z nameraných dát možno ďalej konštatovať, že hĺbka korózneho napadnutia v  $\mu\text{m}/\text{rok}$  na vzorkách osadených na mostoch a aj staniách je výrazne väčšia u tých, ktoré boli opätovne čistené v porovnaní s tými, ktoré boli vystavené účinkom atmosféry rovnaký čas bez zásahu. Potvrzuje sa tak známy fakt, že po začiatočnom štádiu vzniku korózie je postup tohto procesu spomalený práve vrstvou korózných spodín na povrchu kovu, nakoľko táto vrstva chráni materiál pred ďalšou rýchlou degradáciou. Opätovným čistením vzoriek sa táto ochrana vrstva odstránila a priebeh korózie bol výraznejší.

Merania v korózných komorách majú svoj veľký význam, no pri ich vyhodnocovaní a porovnávaní s nameranými údajmi in-situ by bolo potrebné väčšie množstvo dát. Simulované prostredie iba na báze soľnej hmly roztoku NaCl je schopné iba čiastočne vystihnúť skutočné atmosférické podmienky.

Vytvorenie aplikácie, ktorá slúži na analýzu odolnosti ocelových prvkov a zároveň je jednoduchou náhradou komplikovaných korózných modelov pre inžiniersku prax. Svojou jednoduchosťou vie zjednodušiť výpočet prierezových charakteristík ľubovoľného prvku v čase a s voliteľným priebehom degradácie po priereze.

## **6.2 Prínos práce pre rozvoj vedného odboru a prax**

Práca mala za úlohu sledovať agresivitu prostredia pomocou in-situ meraní a vyhodnotiť hmotnostné úbytky na koróznou rýchlosť  $r_{\text{corr}}$ . Porovnať výsledky merania na vzorkách umiestnených na mostných objektoch a referenčných staniách, sledovať vplyv viacnásobného očistenia vzorky. Prinesené výsledky ukazujú že je pre konštrukčný prvok lepšie ponechať ho „v obale“ z korozívnych produktov, ktoré bránia ďalšiemu rýchlemu prenikaniu korózie do konštrukcie.

Teoretické korózne modely sú pre inžiniersku prax zdĺhavé a náročné, preto sme sa venovali aplikácií hmotnostných úbytkov na prierez nitovaného nosníka. Vzhľadom na súčasný stav, kde značná časť ocelových mostov sa blíži k svojej návrhovej životnosti bude potrebné v čoraz väčšej miere posudzovať ich odolnosť. A v tom vie byť vytvorená aplikácia prospešná.

## **6.3 Odporúčania pre ďalší výskum**

V pokračujúcom výskume korózných úbytkov je potrebné získavať ďalšie dáta a overiť údaje namerané in-situ s funkciou dávka-odozva. Nakoľko ocelové mosty začínajú svoju životnosť s ochranným náterom je nutné zistiť čas, po ktorom sa prejavia účinky agresívneho prostredia v podobe korózie. Na tento účel by sa mali použiť zrýchlene skúšky v koróznej komore, keďže v reálnom prostredí by sa jednalo o niekoľko rokov.

Celkový priebeh korozívneho napadnutia závisí od viacerých faktorov, či už je to depozícia chloridov, alebo relatívna vlhkosť, ktoré sa dajú relatívne jednoducho odmerať. No fenomén polohy prvku v rámci konštrukcie je bez množstva dát, len ťažko vyčísliteľný. Pilotný výskumný program sa už začal na moste v Žiline-Rosina, no pre lepšie pochopenie problematiky je potrebné osadiť vzorky na viacerých typoch mostných konštrukcií.

## **7. ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY**

- [1] Vičan, J., Gocál, J., Melis, B., Koteš, P., Kotula, P., 2008. Real Behaviour and Remaining Lifetime of Bridge Structures. Communications - Scientific Letters of the University of Zilina, 10(2), 30-37.
- [2] Štatistické prehľady o stave cestných mostov. 2021. <https://www.ssc.sk/sk/cinnosti/rozvoj-cestnej-siete/hospodarenie-s-mostami/statisticke-prehlady-o-stave-cestnych-mostov.ssc>
- [3] Výročná správa 2021. <https://www.zsr.sk/o-nas/vyroczne-spravy/>
- [4] Mrázik A.: Teória spoľahlivosti oceľových konštrukcii, Vydavateľstvo slovenskej akadémie vied, Bratislava 1987
- [5] STN EN 1991 – 1 – 1: Základy navrhovania a zaťaženia konštrukcii - Časť 1: Základy navrhovania.
- [6] STN 731401: Navrhovanie oceľových konštrukcii, UNMS Bratislava, 1991
- [7] STN EN 1993 – 1 – 1 Navrhovanie oceľových konštrukcii. Časť 1-1: Všeobecné pravidlá a pravidlá pre budovy
- [8] TP 02/2016 Zaťažiteľnosť cestných mostov a lávok, SSC, MDVRR SR 2016
- [9] VTP ŽSR Určovanie zaťažiteľnosti železničných mostných objektov, Bratislava
- [10] Z. Agocs, J. Brodnianský, J. Vičan, and J. Ziolko, Assessment and refurbishment of steel structures, Taylor & Francis (2005)
- [11] J. Bujňák, R. Hlinka, J. Odrobiňák, J. Vičan – Diagnostis and evaluation of footbridges. Procedia Engineering 40, 2012
- [12] MULTI-ASSESS, projekt: EU 5FP RTD. Model for multi-pollutant impact and assessment of threshold levels for cultural heritage. Project period: 1.1.2002 – 30.4.2005.
- [13] J. Vičan at all, Effect of environmental actions on engineering, Project of the SRDA SK-PL-2015-0004, University of Žilina (2016-2017)
- [14] J. Vičan, A. Spiewak, J. Odrobiňák, M. Ulewicz – Effect of Environmental Actions on Engineering Constructions.
- [15] Kreislová, K. – Geiplová, H. – Skrořepová, I. – Skořepa, J. - Majtás D.: Nové mapy korozní agresivity České republiky. „DE GRUYTER OPEN“, 2015, p. 81-86.
- [16] Kreislová, K., - Knotková, D. - Skořepová, I.: Korozní mapa ČR pro zinek. SVÚOM Praha, 2009.
- [17] ČSN EN ISO 9226 (038210) Korozie kovů a slitin. Korozie kovů a slitin. Korozní agresivita atmosfér. Stanovení korozní rychlosti standardních vzorků pro určení korozní agresivity. 1.10. 2012.
- [18] ČSN ISO 9226 (038210) Korozie kovů a slitin. Korozní agresivita atmosfér. Stanovení korozní rychlosti standardních vzorků pro určení korozní agresivity. 1. 12.1994.

- [19] ČSN EN ISO 9223 (038203) Korózie kovů a slitin. Korózní agresivita atmosféry. Klasifikace, stanovení a odhad. 1.10. 2012
- [20] ČSN EN ISO 9224 (038208) Korózie kovů a slitin. Korózní agresivita atmosféry. Směrné hodnoty pro stupně korózní agresivity. 1. 10. 2012
- [21] Agköl F., Frangopol D. M.: Lifetime performance analysis of existing steel girder bridge superstructures, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, 2004
- [22] Melchers R. E.: Corrosion Uncertainty Modelling for Steel Structures, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, 1999
- [23] Guedes Soares C., Garbatov Y.: Reliability of maintained, corrosion protected plates subjected to non-linear corrosion and compressive loads, *Marine Structures*, 1999
- [24] Qin S., Cui W.: Effect of corrosion models on the time-dependent reliability of steel plated elements, *Marine Structures*, Elsevier, 2003
- [25] STN EN ISO 9223: Korózia kovov a zliatin. Korózná agresivita atmosféry. Klasifikácia, stanovenie a odhad (ISO 9223: 2012)
- [26] STN EN ISO 9224: Korózia kovov a zliatin. Korózná agresivita atmosféry. Smerné hodnoty pre stupne korózne agresivity (ISO 9224: 2012)
- [27] J. Odrobiňák, J. Gocál, J. Jošt – Experimentálne meranie korózneho úbytku konštrukčnej ocele.42. Aktív pracovníkov odboru oceľových konštrukcií 2017
- [28] STN EN ISO 9227: Skúšky korózie v umelých atmosférach. Skúšky soľnou hmlou (ISO 9227: 2012).
- [29] STN EN ISO 9225: Korózia kovov a zliatin. Korózná agresivita atmosféry. Meranie parametrov prostredia ovplyvňujúcich koróznú agresivitu atmosféry. (ISO 9225: 2012)
- [30] STN EN ISO 9226: Korózia kovov a zliatin. Korózná agresivita atmosféry. Stanovenie koróznej rýchlosti normalizovaných vzoriek na vyhodnocovanie koróznej agresivity (ISO 9226: 2012)
- [31] Tidblad, J.; Kreislová, K.; Faller, M.; De la Fuente, D.; Yates, T.; Verney-Carron, A.; Grøntoft, T.; Gordon, A.; Hans, U. ICP Materials Trends in Corrosion, Soiling and Air Pollution (1987–2014). *Materials* 2017, 10, 969.  
<https://doi.org/10.3390/ma10080969>
- [32] STN EN ISO 9224: Korózia kovov a zliatin. Korózná agresivita atmosféry. Smerné hodnoty pre stupne korózne agresivity, (ISO 9224: 2012). SÚTN Bratislava, 2012.
- [33] ASTM G101 - 04(2015): Standard Guide for Estimating the Atmospheric Corrosion Resistance of Low-Alloy Steels. ASTM International, 2015.
- [34] Gocál, J.; Odrobiňák, J. On the Influence of Corrosion on the Load-Carrying Capacity of Old Riveted Bridges. *Materials* 2020, 13, 717.  
<https://doi.org/10.3390/ma13030717>
- [35] Odrobiňák, J.; Gocál, J.: Experimental measurement of structural steel corrosion, *Procedia Structural Integrity*, Volume 13, 2018, Pages 1947-1954,

- [36] Rahgozar, R.: Remaining capacity assessment of corrosion damaged beams using minimum curves, *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 65, Issue 2, 2009.
- [37] Bin Hu: Reliability analysis and remaining life prediction of selected type corroded-damage railway overhead structure, doctoral thesis, College of Science, Engineering and Health, RMIT University August 2017
- [38] Itoh, Yoshito and In-Tae Kim. "Accelerated cyclic corrosion testing of structural steels and its application to assess steel bridge coatings." *Anti-corrosion Methods and Materials* 53 (2006): 374-381.
- [39] Odrobiňák, J., Hlinka, R., 2016. Degradation of steel footbridges with neglected inspection and maintenance. *Procedia Engineering* 156 (Bridges in Danube Basin 2016), Elsevier, p. 304-311
- [40] Bujňák, J., Gocál, J., Hlinka, R., 2016. Assessment of Railway Steel Bridge Structures. *Procedia Engineering* 156 (Bridges in Danube Basin 2016), Elsevier, p. 75-82.
- [41] KVOCAK, V., VARGOVA, R., BEKE, P., TERPAKOVA, E.: Effects of Atmospheric Corrosion on the Car Park Roof Structure, *Communications - Scientific letters of the University of Zilina*, vol. 14, No. 1, pp. 80-87, ISSN 1335-4205.
- [42] J. Vičan and P. Koteš, *Hodnotenie existujúcich mostných objektov. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline*, 2018.
- [43] Sarveswaran, V., J. Smith, and D. Blockley,: Reliability of corrosion-damaged steel structures using interval probability theory. *Structural Safety*, 1998. 20(3): p. 237-255.
- [44] Křivý, V. - Vavrušová, K.: Experimental testing of Corrosion Process on Weathering Steel Bridges. In: *Recent Advances in Engineering - ECCIE '12*, Paris, 2012, WSEAS Press 2012, p. 147-151.
- [45] Chwastek, A.: Durability of cross-sections of steel bridge girders made of steel S355J2 + N with consideraion of atmospheric corrosion. Thesis, *Częstochowa University of Technology, Częstochowa*, 2017.
- [46] Strieška, M.: Influence Of Corrosion On Reliability Of Reinforced Concrete Structures, dizertačná práca, SvF UNIZA, 183s, 2019
- [47] Kotes, P., Brodnan, M., Bahleda, F., 2016. Diagnostics of Corrosion on a Real Bridge Structure. *Advances In Materials Science And Engineering*
- [48] Thof-Cristensen, P.: Estimation of the service lifetime of concrete bridges. Proc. ASCE Structures congress XV, Portland, Oregon, USA, April 13-16, 1997
- [49] Křivý, V., Kubzová, M., Konečný, P., & Kreislová, K. (2019). Corrosion processes on weathering steel bridges influenced by deposition of de-icing salts. *Materials*, 12
- [50] Tibdlad, J.: Atmospheric corrosion of metals in 1020-2039 and 2070-2099. Elsevier, doi: 10.1016/j.atmosenv.2012.081

- [51] Koteš P, Kotula P, Odrobiňák J, Prokop J. Diagnostics and evaluation of two atypical girder bridges on railway line. *Key Eng Mat* 2022;930:211-6.
- [52] Vičan, J.; Gocál, J.; Hlinka, R.; Odrobiňák, J.; Moravčík, M.; Koteš, P. Určovanie zaťažiteľnosti Železničných mostov/: Bratislava, Slovakia, 2015.
- [53] Vičan, J.; Gocál, J.; Hlinka, R.; Odrobiňák, J.; Moravčík, M.; Koteš, P: Metodický pokyn pro určování zatížitelnosti železničních mostních objektu

## **8. PUBLIKAČNÁ ČINNOSŤ AUTORA**

- [1] Jančula, M., Vičan, J., Spiewak, A.: Impact of environmental actions on steel structures, 29 R-P-S Seminar Theoretical Foundation of Civil Engineering [electronic]. - 1. vyd. - Bristol: IOP Publishing, 2021. - s. [1-5] [online].
- [2] M. Jančula, J. Jošt, J. Gocál. - Influence of aggressive environmental actions on bridge structures, In: 14th International scientific conference on sustainable, modern and safe transport
- [3] M. Jančula, M. Neslušan, F. Pastorek, M. Pitoňák, J. Gocál, - Monitoring of corrosion extent in steel S460MC by the use of magnetic Barkhausen noise emission, In: *Journal of Nondestructive Evaluation* - ISSN 0195-9298. - Roč. 40, č. 3 (2021), s. [1-11].
- [4] M. Jančula, J. Vičan, A. Spiewak. - Experimental research of corrosion effects on steel bridges, In: 28 R-P-S Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering
- [5] J. Vičan, J. Odrobiňák, J. Gocál., M. Jančula, A. Spiewak. - Experimentálne meranie vplyvov znečistenia prostredia na konštrukčnú oceľ [print], 44. aktív pracovníkov odboru oceľových konštrukcií [print] : zborník príspevkov. - 1. vyd
- [6] J. Vičan, J. Odrobiňák, M. Jančula, A. Spiewak, J. Gocál. - Experimental measurement of environmental actions on structural steel members, TRANSCOM 2019: conference proceedings. - ISSN 2352-1465. - 1. vyd
- [7] F. Bahleda, F. Pastorek, M. Jančula, - Vplyv korózie na mechanické vlastnosti betonárskej výstuže a rýchlosť korózie, In: *Betonárske dni 2018* : zborník príspevkov.
- [8] M. Jančula, J. Vičan, A. Spiewak. - Experimentálny výskum účinkov korózie na oceľové mosty, Theoretical Foundation of Civil Engineering, In: 43. aktív pracovníkov odboru oceľových konštrukcií [print] : zborník prednášok. - 1. vyd