

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 NA ODOLNOSŤ POZDĹŽNIKOV EXISTUJÚCICH ŽELEZNIČNÝCH MOSTOV

Ing. Branislav Vavák

Žilina január 2026

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

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

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

Oponenti: 1. prof. Ing. Josef Vičan, CSc.
Žilinská univerzita v Žiline, Stavebná fakulta, KSKM
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

2. Ing. Jaroslav Repa, PhD.
Stavokov projekt s.r.o.
Brnianska 10 911 05 Trenčín

3. doc. Ing. Vít Křivý, PhD.
Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební, Katedra konstrukcí
Ludvíka Poděště 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 schválenou spoločnou odborovou komisiou dňa

študijný odbor: Stavebníctvo

študijný program: Teória a konštrukcie pozemných staveb

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.

OBSAH

ÚVOD	4
2 TÉZY DIZERTAČNEJ PRÁCE.....	5
3 TEORETICKÝ ZÁKLAD PRE RIEŠENIE PROBLEMATIKY	5
4 ZMAPOVANIE A VYHODNOTENIE ROZSAHU KORÓZIE NA POZDĽŽNÍKOV STARÝCH MOSTOV V RÁMCI SIETE ŽSR	10
5 ŠTATISTICKÁ ANALÝZA DOPADOV RÔZNE ROZMIESTNENEJ KORÓZIE NA ODOLNOSŤ POZDĽŽNÍKOV	13
6 CITLIVOSTNÁ ANALÝZA DOPADOV RÔZNE SILNEJ KORÓZIE NA RÔZNYCH ČASTIACH PRIEREZU NA ODOLNOSŤ POZDĽŽNÍKOV.....	19
7 MOŽNÁ PREDIKCIA VÝVOJA ZAŤAŽITEĽNOSTI STARÝCH POZDĽŽNÍKOV V RÁMCI ŽSR.....	22
8 ZÁVER	26
VÝBER Z POUŽITEJ LITERATÚRY	30
PUBLIKOVANÉ ČLÁNKY	31

ÚVOD

Oceľové železničné mosty na tratiach Železníc Slovenskej republiky nie sú majoritné z hľadiska početnosti, no z pohľadu dôležitosti sú často kľúčovým prvkom každého traťového úseku. Spravidla najviac namáhaným prvkom oceľových mostov s prvkovou mostovkou je pozdĺžnik. Často je preto tým najkritickejším prvkom z pohľadu zaťažiteľnosti. Môžeme povedať, že všetky materiály používané v stavebníctve podliehajú degradácii vplyvom agresivity prostredia, v ktorom sa nachádzajú.

Najväčší vplyv na degradáciu ocele má korózia, ktorá oslabuje účinný prierez a tým aj jeho odolnosť, čo má dopad aj na životnosť a prevádzkyschopnosť s plným projektovaným zaťažením, pri jeho návrhu v minulosti. V extrémnych prípadoch môže dôjsť až ku kolapsu mosta obr.1. U oceľových mostov je tento jav skôr výnimočný a nie je náhly ako u iných typov konštrukcií, napr. u predpätých mostov vplyvom straty predpätia. Pravidelnými prehliadkami mu vieme predchádzať.



Kolaps oceľového mosta v USA vo Virgínii v roku 1967 [1]

Fyzikálno-chemické reakcie zapríčinené koróziou trvalo menia chemické, fyzikálne a mechanické vlastnosti materiálu. Samotné prejavy korózie bývajú veľmi rozmanité a závisia od prostredia a všetkých vonkajších a vnútorných faktorov a od charakteru materiálu. V prípade oceľových pozdĺžnikov, korózia v prvom rade (primárne) spôsobuje zmenšovanie priečneho rezu, čo ovplyvňuje odolnosť prvku (medzný stav únosnosti). V prípade oslabenia prierezu natoľko, že dochádza k nadmerným priehybom, ovplyvňuje aj používateľnosť konštrukcie (medzný stav používateľnosti). Korózia ocele (korózný úbytok) je pomerne komplikovaný proces, ktorý je možné merať buď v zrýchlených podmienkach v korózne komore, urýchlenným testom v laboratóriu pomocou elektrochemickej korózie [2], alebo in-situ na reálnych vzorkách. Nakoľko práca je zameraná na existujúce mosty, všetky merania prebiehali in situ. Poznatky z podkladov [3] a nameraných údajov o vybraných mostoch boli podkladom pre stanovenie priebehu korózie po obvod prierezu pozdĺžnika. Bola urobená štatistická a citlivostná analýza rôzne rozmiesnenej korózie na odolnosť prierezov pozdĺžnikov a na základe výsledkov je odporúčaná predikcia vývoja zaťažiteľnosti starých pozdĺžnikov v rámci ŽSR.

1 TÉZY DIZERTAČNEJ PRÁCE

Cieľom dizertačnej práce je analyzovať vplyv korózie na odolnosť pozdĺžnikov existujúcich oceľových mostov s prvkovou mostovkou. Prehľbiť poznatky o lokalizácii korózie na existujúcich pozdĺžnikoch. Stanoviť ich odolnosť a dať odporúčania do budúcnosti s dosahom na ich zaťažiteľnosť.

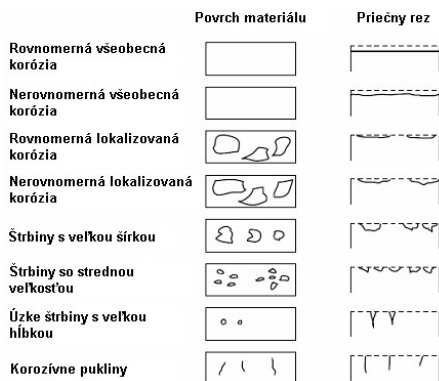
V priebehu obhajoby projektu dizertačnej práce boli skúšobnou komisiou schválené nasledujúce tézy:

1. Zmapovanie a vyhodnotenie rozsahu korózie na pozdĺžnikoch starých mostov v rámci siete ŽSR.
2. Štatistická analýza dopadov rôzne rozmiestnenej korózie na odolnosť pozdĺžnikov.
3. Citlivostná analýza dopadov rôzne silnej korózie na rôznych častiach prierezu na odolnosť pozdĺžnikov.
4. Syntéza výsledkov a odporúčania vo forme možnej predikcie vývoja zaťažiteľnosti starých pozdĺžnikov v rámci ŽSR.

2 TEORETICKÝ ZÁKLAD PRE RIEŠENIE PROBLEMATIKY

2.1 Korózia a jej typy

Z pohľadu geometrického rozmiestnenia korózie po povrchu sú na **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.** znázornené rôzne typy korózných poškodení, bez bližšieho určenia mechanizmu procesu / progresu korózie rezultujúceho do úbytku materiálu. Časová závislosť a geometrické charakteristiky korózie môžu byť definované stochastickými charakteristikami priestorového náhodného poľa. Pokiaľ korózia a jej geometrický tvar bude definovaný pomocou rovnomernej alebo lokalizovanej korózie, potom kombináciou týchto dvoch druhov, bude definovaná väčšina problémov predstavujúcich reálne správanie materiálu zaťaženého koróziou.

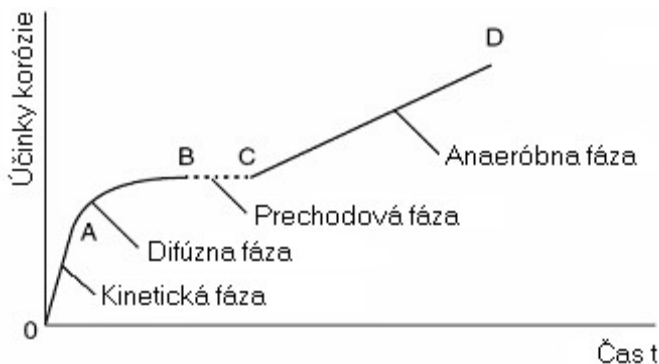


Obr. 2.1 Korózia z pohľadu geometrického rozmiestnenia

2.2 Modelovanie účinkov korózie na odolnosť konštrukcií

Súčasným štandardným prístupom v teórii spoľahlivosti je overovanie spoľahlivosti konštrukcií z hľadiska stáleho a občasného zaťaženia, prípadne mimoriadneho zaťaženia

konštrukcií. Nepriamo sa v posudku zohľadňuje porucha konštrukcie a poškodenie environmentálnym zaťažením agresivitou prostredia a jej zmenami počas projektovanej životnosti konštrukcie. Metódy overovania konštrukcií z hľadiska trvanlivosti ešte neboli aplikované v praktických aplikáciách, pretože modely degradácie materiálov nie sú dostatočne rozpracované. Pretože charakter účinkov je premenný v čase, sú vhodné hlavne pre dlhodobé výskumné úlohy.



Obr. 2.2 Model mechanizmu postupného rozvoja účinkov korózie v čase

2.3 Korózne modely

Pre inžiniersku prax bolo vytvorených niekoľko korózných modelov:

Model: Frangopol

Pre všeobecnú aplikáciu v metódach pre odhad spoľahlivosti a životnosti existujúcich oceľových mostov, ktorý vznikol na základe rozsiahleho výskumu [4], bol vytvorený model Frangopol.

Model: Melchers-Southwell

Časovo premenné korózne účinky, ktoré by mohli byť použité pre vysvetlenie reálneho správania meraného in-situ a zároveň pri návrhu novej konštrukcie, zohľadňuje prediktívny model Melchers-Southwell. Autori na základe dostupných poznatkov taktiež konštatujú, že korózia je funkciou viacerých náhodne premenných a za účelom jej popisu bude najvhodnejšie vytvoriť pravdepodobnostný model, ktorý potom bude mať aplikáciu v oblasti spoľahlivostného hodnotenia konštrukcií [5]

Model: Guedes Soares

Nelineárna funkcia popisujúca tento model správania sa reálnej konštrukcie, v rámci ktorej je možné vystihnúť počiatočné štádium bez korózie, kedy je ešte použitý systém PKO plnohodnotný a tiež následný exponenciálny nárast úbytkov materiálu, až po určitú hodnotu reprezentujúcu ustálený stav. [6].

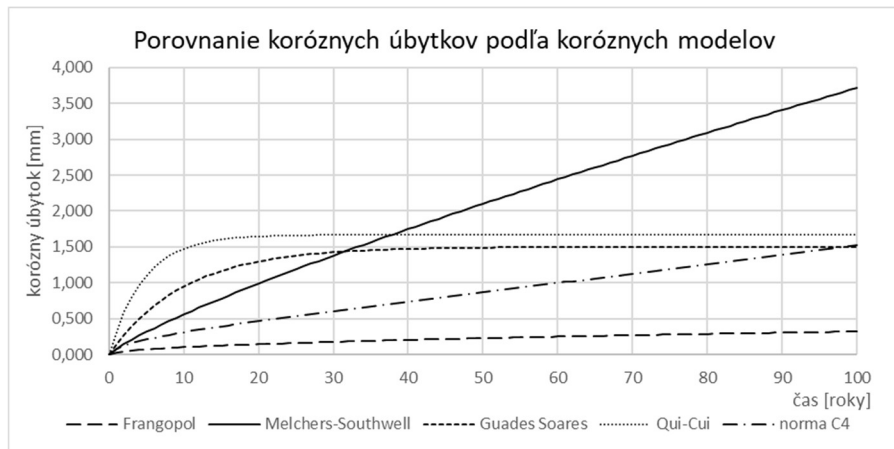
Model: Qin – Cui

Cieľom preto bolo porovnať a vyhodnotiť dostupné modely korózie a na základe získaných poznatkov o účinkoch mechanizmu korózie navrhnúť inovatívnejší model, ktorý by zovšeobecňoval a dokázal by lepšie vystihnúť vplyvy korózie na oceľové konštrukcie.

Všestrannosť tohoto modelu by bola na vyššej úrovni a bol by schopný zahrnúť väčšie množstvo špecifických situácií, ktoré môžu nastať pre existujúce konštrukcie ovplyvnené degradáciou [7].

Dose-response funkcie - normový prístup

Koróziou kovov a zliatin sa zaoberajú normy [8]. Kovy, zliatiny a kovové povlaky môžu podliehať atmosférickej korózii vtedy, keď je ich povrch mokry (vlhký). Rýchlosť napadnutia a ich charakter závisí od vlastností elektrolytov vytvorených na povrchu, hlavne v súvislosti s úrovňou a druhom plyných a tuhých nečistôt v atmosfére a dĺžkou ich pôsobenia na povrchu kovov. Porovnanie korózných modelov:



obr. 2.3 Porovnanie korózných modelov

2.4 Zaťažiteľnosť pozdĺžnikov

Teória spoľahlivosti

Ukazovateľom spoľahlivosti konštrukcie je pravdepodobnosť jej bezporuchového stavu počas celej životnosti za prevádzky, to znamená, že v priebehu stanoveného predpokladaného času nevznikne ani jedna vážnejšia porucha – medzný stav, pri ktorom je nevyhnutné použitie obmedziť, prerušiť alebo konštrukciu úplne uzavrieť.

Hodnotenia spoľahlivosti – rozdelenie

- *Deterministické metódy*

Metódy, pri ktorých je charakteristické zavádzanie determinovaných hodnôt účinkov zaťaženia a odolnosti, ktoré sa zohľadňovali cez empirické súčinitele. V dnešnej dobe sa už tieto metódy nepoužívajú, patria medzi ne: metóda stupňa bezpečnosti a metóda dovolených namáhání. Nakoľko neistota vstupných údajov a odborný odhad na strane bezpečnosti viedla k predimenzovaným konštrukciám, ktoré sú používané dodnes aj napriek tomu, že návrhové zaťaženie bolo oveľa nižšie v tej dobe ako dnes.

- *Pravdepodobnostné metódy*

Napredovaním v teoretickej oblasti, štatistickým vyhodnocovaním veľkého množstva údajov, vlastností materiálov a zaťaženia, viedlo k rozvoju pravdepodobnostných metód. Výbory

ASCE (Committee on Load and Resistance Factor Design) a JCSS (Joint Committee on Structural Safety) rozdelili na základe pravdepodobnostných metód a stupňa náhodného charakteru vstupných parametrov metódy hodnotenia spoľahlivosti do troch úrovní:

Pravdepodobnostné metódy prvej úrovne

Pravdepodobnostné metódy druhej úrovne

Pravdepodobnostné metódy vyšších úrovní

Inžinierska metóda teórie spoľahlivosti

Inžinierske prístupy sú založené na pravdepodobnostnom vyhodnotení rezervy spoľahlivosti. Pre zjednodušenie zápisov sa uvažuje, že náhodne premenná odolnosť $R(t)$ a náhodne premenné účinky zaťaženia $E(t)$ sú nezávislé od času. Potom sa pre zápisy použijú označenia náhodne premenných ako R a E . Spoľahlivosť konštrukcie požaduje, aby rezerva spoľahlivosti vyhovovala podmienke

$$G = R - E \geq 0 \quad (2.5)$$

Metóda parciálnych súčiniteľov

Metóda sa zaraďuje medzi polopravdepodobnostné metódy prvej úrovne a v súčasnosti je základnou metódou pre overovanie spoľahlivosti stavebných konštrukcií v platných normách. Vplyv náhodnej premennosti vstupných parametrov procesu posudzovania spoľahlivosti je vyjadrený jednotlivými parciálnymi súčiniteľmi. Preto sú tieto metódy označované aj ako metódy parciálnych súčiniteľov. Od roku 1968 sa uplatňuje táto metodika aj u nás. Princíp využitia parciálnych súčiniteľov bol uvedený N. Streleckim v r. 1947 [9]

2.5 Zaťažiteľnosť a odolnosť prierezov

Zaťažiteľnosť existujúcich železničných mostov je rozhodujúcim kritériom spoľahlivostného hodnotenia. Podrobným statickým prepočtom podľa smernice [10] sa stanovuje zaťažiteľnosť mostného objektu alebo jeho časti. Chápaná je ako pomer najvyšších prípustných účinkov zvislého premenného krátkodobého zaťaženia dopravou z hľadiska medzných stavov k účinkom, ktoré v mostnej konštrukcii vyvodí príslušný zaťažovací model premenného krátkodobého zaťaženia. V prípade železničných mostov je zaťažiteľnosť definovaná ako pomer najvyšších prípustných účinkov zvislého premenného krátkodobého zaťaženia železničnou dopravou z hľadiska medzných stavov k účinkom, ktoré v mostnej konštrukcii vyvodí zaťažovací model ideálneho vlaku LM 71. V starších prepočtoch bol používaný model vlaku UIC – 71. Vzťah pre vyjadrenie zaťažiteľnosti železničných mostov:

$$Z_{LM71} = \left(R_d - \sum_{i=1}^{n-1} E_{rs,Ed,i} \right) / E_{LM71,Ed} \quad (2.7)$$

2.6 Simulačná metóda – Monte Carlo

Na približné určenie stochastických a deterministických dejov popísaných v matematike či štatistike bola vyvinutá simulačná metóda Monte Carlo. Je pomenovaná podľa mesta Monte Carlo, ktoré je známe hlavne kasínami. Prvý krát tento termín použili fyzici Neumann a Ulam pri zostrojení atómovej bomby v USA počas druhej svetovej vojny, [11].

Simulačná metóda Monte Carlo je všestranne používaná, nakoľko je veľmi jednoduchá aj napriek veľkej náročnosti na výpočtový výkon počítačov. Simulovaný proces je potrebné definovať na zostavenie pravdepodobnostného problému, ktorý má zhodné riešenie s

pôvodným problémom. V rámci neho generujeme (simulujeme) veľké množstvo náhodných čísel transformovaných do veličín s daným štatistickým rozdelením. Z nich potom vyvodzujeme štatistické závery s istou presnosťou závislou na množstve simulovaných dát. Výsledkom je náhodná veličina ξ podľa (2.26) a jej smerodajná odchýlka σ (2.27)

$$\xi \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.26)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}} \quad (2.27)$$

kde:

ξ - náhodná veličina

n - počet simulácií

x_i - simulovaná veličina

σ - smerodajná odchýlka

Na odhad chyby výsledku metódou Monte Carlo sa používa zväčša stredná kvadratická chyba aritmetického priemeru. Chyba získaného výsledku pre n simulácií je úmerná $1/\sqrt{n}$, z čoho vyplýva pokiaľ chceme zlepšiť výsledok o jeden rád, musíme počet simulácií zvýšiť aspoň o dva rády.

2.7 Meranie hrúbok a korózných úbytkov

Na meranie hrúbok bola použitá nedeštruktívna ultrazvuková metóda EMAT alebo elektromagnetický akustický prevodník je ultrazvuková testovacia (UT) technika, ktorá generuje zvuk v kontrolovanej časti namiesto prevodníka. EMAT indukuje ultrazvukové vlny do testovaného objektu pomocou dvoch interagujúcich magnetických polí. Použitý prístroj Innerspec CODA obr.2.4. Pre meranie základných rozmerov bolo použité posuvné meradlo INSIZE 0-500mm s presnosťou 0,01mm obr. 2.5



obr. 2.4 Prístroj CODA

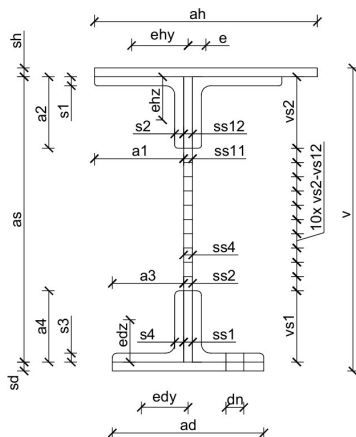


obr.2.5 Meranie rozmerov

2.8 Výpočtový model univerzálneho prierezu pozdĺžnika

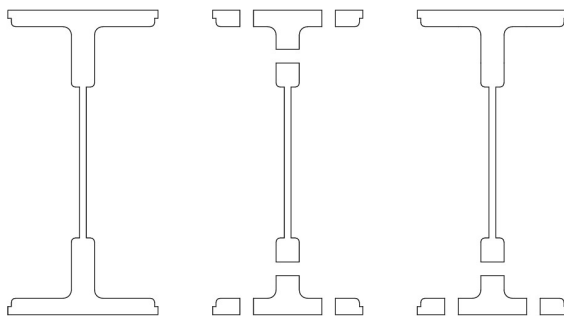
Prierezové charakteristiky boli počítané podľa vzorcov pre výpočet plôch a napr. každý uholník bol rozdelený na 8 plôch tak aby bol presne spočítaný. Všetky parametre prierezu sú zadávané parametricky a teda sa dajú meniť. To bol základný princíp toho, aby sa dal

prierez simulovať v rôznych hrúbkach či výškach alebo šírkach. Každá jedna hodnota mohla byť menená podľa iného kritéria alebo vzorca predom definovaného.



Obr.2.6 Výpočtový model pozdĺžnika

Tak isto boli použité algoritmy na vytváranie náhodných premenných na simulovanie rôznych prierezov, nezávisle od seba vo vopred stanovených kritériách. Pre výpočet odolnosti v jednotlivých namáhaniach boli počítané prierez plný, polo-oslabený prierez o nity v ťahu v spodných vláknach pri ohybe a plne oslabený prierez v ťahu obr. 2.7.



Obr. 2.7 Schéma prierezu plného, oslabeného a polooslabeného

3 ZMAPOVANIE A VYHODNOTENIE ROZSAHU KORÓZIE NA POZDĽŽNÍKOVCH STARÝCH MOSTOV V RÁMCI SIETE ŽSR

3.1 Pozdĺžniky na starých mostoch - Bratislavská časť

Zdrojom bol informačný systém ŽSR – Passport mostov a mostom podobných konštrukcií. Pre podrobnejší prehľad o konštrukcii pozdĺžnikov a ich rozmeroch bola spracovaná štatistika

oceľových mostov. Tieto informácie boli čerpané z podrobných prehliadok mostov, kde je uvedený stručný popis každého pozdĺžnika na jednotlivých konštrukciách. Spolu sa jednalo o 177 mostov ktoré majú 202 rôznych nosných konštrukcií. Ku každému mostu bola vypísaná informácia o pozdĺžniku – výška a dĺžka, popr. urobená poznámka, že nejde o most s prvkovou mostovkou.

tab. 3.1 Rozdelenie oceľových mostov podľa typu nosnej konštrukcie

Popis OK	počet mostov
prvková mostovka nitovaná	97
prvková mostovka zváraná	12
prvková mostovka z valcovaných profilov	1
prvková mostovka s VP spojmi	1
bez mostovky	58
dvojčité so stoličkami	5
komorový	1
ortotropná doska	1
štrkové lôžko	1
spolu	177

Pre oceľové mosty s prvkovou mostovkou sú spracované ďalšie štatistiky a to závislosť výšky ku dĺžke pozdĺžnika obr.3.2. Z grafu je zrejmé, že pomer výšky a dĺžky osciluje okolo priamky preloženej stredom množiny bodov. Celkový počet oceľových nitovaných konštrukcií mostov v prevádzke na tratiach ŽSR v časti Bratislava je 97. Z týchto mostov bolo vybraných 25 prierezov pozdĺžnikov na základe výšky tak, aby bola obsiahnutá celá škála výšok od 300 – 900mm. Zoznam týchto pozdĺžnikov je obr. 3.2.



Obr.3.2 Závislosť výšky a dĺžky nitovaných pozdĺžnikov

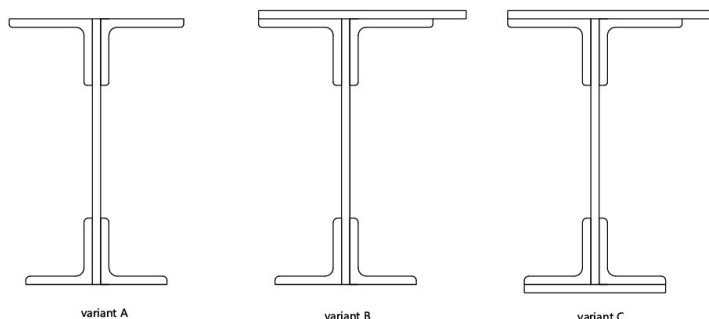
3.2 Typické pozdĺžniky na starých mostoch

Na oceľových mostoch s prvkovou mostovkou v správe ŽSR sa vyskytujú tri varianty nitovaných pozdĺžnikov. Prierezy sú zložené vždy zo steny a vrchných a spodných uholníkov - L profilov. Toto je prvý variant pozdĺžnika obr. 3.3 variant A, aj keď je veľmi zriedkavý.

Tab. 3.2 Vybrané pozdĺžniky mostov pre výpočty

variant (typ) priezru	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
most p.č.	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
šíka pásnice horného L	100	100	100	80	80	80	80	100	100	80	70	100	70	90	80	100	100	100	90	100	70	100	80	130	120	
výška pásnice horného L	75	70	80	80	80	80	80	80	100	80	70	100	70	90	80	100	75	100	90	100	70	100	80	90	90	
hr. horného L pri pásnici	10	11	10	8	10	10	8	10	12	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9	10	10	12	10	12	12	
hr. horného L pri stoline	10	11	10	8	10	10	8	10	12	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9	10	10	12	10	12	12	
vnútorná polomer hor. L	10	10	10	10	10	10	10	10	12	10	9	12	9	11	10	12	10	12	11	12	9	12	10	12	11	
vonkajšie zaoblenie hor. L	6	5	5	5	5	5	5	5	6	6	4,5	6	4,5	5,5	5	6	6	5,5	6	4,5	7	5	6	5,5	5	
šíka pásnice dolného L	100	100	80	80	80	80	80	100	100	100	70	100	70	90	80	100	100	100	90	100	70	150	80	130	120	
výška pásnice dolného L	75	70	80	80	80	80	80	80	100	100	70	100	70	90	80	100	75	100	90	100	70	100	80	90	90	
hr. dolného L pri pásnici	10	11	10	8	10	10	8	10	12	12	10	10	10	10	10	10	10	10	9	10	10	12	10	12	12	
hr. dolného L pri stoline	10	11	10	8	10	10	8	10	12	12	10	10	10	10	10	10	10	10	9	10	10	12	10	12	12	
vnútorný polomer dol. L	10	10	10	10	10	10	10	10	12	12	9	12	9	11	10	12	10	12	11	12	9	13	10	12	11	
vonkajší polomer dol. L	6	5	5	5	5	5	5	5	6	6	4,5	6	4,5	5,5	5	6	6	5,5	6	4,5	7	5	6	5,5	5	
hrubka steny dolná	12	11	18	10	10	12	10	10	10	12	8	10	8	10	12	10	12	10	10	10	12	12	10	14	10	
hrubka steny segment 1	12	11	10	10	10	10	12	10	10	12	8	10	8	10	12	10	12	10	10	10	12	12	10	14	10	
hrubka steny segment 2	12	11	10	10	10	10	12	10	10	12	8	10	8	10	12	10	12	10	10	10	12	12	10	14	10	
hrubka steny segment 3	12	11	10	10	10	10	12	10	10	12	8	10	8	10	12	10	12	10	10	10	12	12	10	14	10	
hrubka steny segment 4	12	11	10	10	10	10	12	10	10	12	8	10	8	10	12	10	12	10	10	10	12	12	10	14	10	
hrubka steny segment 5	12	11	10	10	10	10	12	10	10	12	8	10	8	10	12	10	12	10	10	10	12	12	10	14	10	
hrubka steny horná	12	11	18	10	10	12	10	10	10	12	8	10	8	10	12	10	12	10	10	10	12	12	10	14	10	
šíka hornej pásnice	0	0	220	190	190	190	190	0	240	190	190	220	160	200	220	220	230	220	200	230	180	220	190	300	0	
hrubka hornej pásnice	0	0	10	10	10	12	10	0	10	10	10	12	10	10	12	10	12	8	10	12	10	10	10	12	0	
excentricita hornej pásnice	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
šíka dolnej pásnice	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	190	220	160	200	0	0	0	0	0	0	0	0	190	300	0	
hrubka dolnej pásnice	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	12	10	10	0	0	0	0	0	0	0	0	10	12	0	
pr. nltu dolnej pásnice	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	20	20	20	0	0	0	0	0	0	0	0	20	20	0	
pr. nltu steny	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
pr. nltu hornej pásnice	0	0	20	20	20	20	20	0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	0	
ex. nltu na dolnej pásnici	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	44	60	44	55	0	0	0	0	0	0	0	0	50	78	0	
ex. nltu na stene dole	43	41	45	44	45	45	44	45	56	56	40	55	40	55	45	55	43	55	50	55	40	56	45	51	51	
ex. nltu na hornej pásnici	0	0	60	49	50	51	49	60	61	51	44	60	44	55	51	60	61	60	55	60	46	62	50	78	0	
ex. nltu na stene hore	43	41	45	44	45	45	44	45	56	45	40	55	40	55	45	55	43	55	50	55	40	56	45	51	51	
súčiniteľ materiálu	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
medera kltu	235	235	235	235	235	235	235	235	235	235	235	235	235	235	235	235	235	235	235	235	235	235	235	235	235	
počet delení	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
výška priezru	300	320	330	340	370	382	390	400	400	406	420	444	460	470	512	520	522	538	610	612	650	730	770	774	900	
výška segmentu steny	30	36	32	34	40	42	44	48	38	43,2	52	44	60	54	68	62	72	66	84	80	100	104	118	144	144	
výška steny spodná	75	70	80	80	80	80	80	80	80	100	100	70	100	70	90	80	100	75	100	90	100	70	100	80	90	
výška steny horná	75	70	80	80	80	80	80	80	80	100	100	70	100	70	90	80	100	75	100	90	100	70	100	80	90	
výška steny	300	320	320	330	360	370	380	400	390	396	400	420	440	450	500	510	510	530	600	600	640	720	750	750	900	

Z vybraných 25 mostov pre analýzu bol 4x, používal sa najčastejšie v prípadoch nízkeho alebo vysokého prierezu Druhý variant B je pozdĺžnik, kde k predošlému prierezu je pridaná vrchná nitovaná pásnica, ktorá je zvyčajne excentrická na vonkajšiu stranu od pozdĺžnikov s otvorom pre skrutku na plošné uchytenie mostníc.



obr. 3.3 Varianty pozdĺžnikov na existujúcich mostoch

4 ŠTATISTICKÁ ANALÝZA DOPADOV RÔZNE ROZMIESTNENEJ KORÓZIE NA ODOLNOSŤ POZDĹŽNIKOV

4.1 Analýza rozmiestnenia korózie po priereze

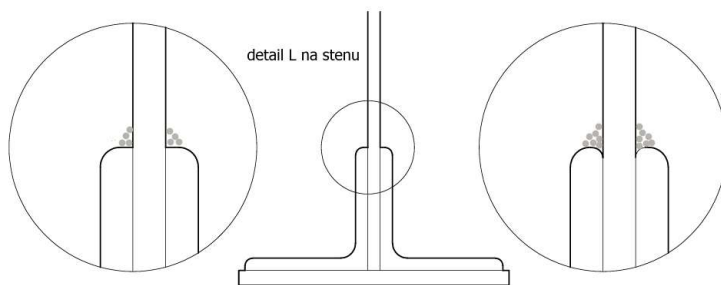
Mostov s prvkovou nitovanou mostovkou v časti Bratislava je 97 a úbytok materiálu na pozdĺžnikoch bol popísaný iba na 14 z nich podľa podrobných prehliadok tab. 4.1, čo netvorí ani 15% mostov. Avšak, napríklad pri meraniach mosta v km 11,043, kde bol uvedený úbytok v správe až 25% materiálu, reálne nameraný úbytok voči nominálnym hodnotám z projektu činil cca 1-3%. Stanovená miera korózie zo správ bude ďalej považovaná za iba odhadovanú a nie meranú a preto tieto hodnotenia neuvažujeme ako smerodajné. Za smerodajné budeme uvažovať iba jej rozmiestnenie po priereze. V najčastejších prípadoch sú to vodorovné plochy ako je vrchná pásnica alebo vrchná časť u prierezov varianty „A“ a vodorovné časti spodných uholníkov - L profilov. Pravdepodobne z nedokonalého valcovania L profilov, kedy jeho hrana nebola kolmá na vonkajšiu stranu profilu a bolo na hrane zaoblenie. Ak tieto profily boli nitované k stene, v mieste hornej hrany uholníka, kde má byť vodorovná ploška sa vyskytuje jemný žliabok pri ramene L profilu vznikalo miesto, kde bol častý výskyt vody a nečistôt obr. 4.1, kedy jeho hrana nebola kolmá na vonkajšiu stranu profilu a bolo na hrane zaoblenie. Ak tieto profily boli nitované ku stene, v mieste hornej hrany uholníka, kde má byť vodorovná ploška sa vyskytuje jemný žliabok pri ramene L profilu vznikalo miesto, kde bol častý výskyt vody a nečistôt obr.4.1 (elektrolytu z pohľadu korózie) vznikala lokálna korózia v mieste spodnej časti steny pozdĺžnika a L profilu, ktorá sa širila smerom hore po stene pravdepodobne vztláním vody po korozívnych splodinách (hrdzi) alebo vplyvom biologickej degradácie SPKO a následne dochádzalo ku korózii v tom mieste obr.3.4. Toto je asi druhý

najčastejší jav, ktorý sa v revízných správach opakoval. A tretím najčastejším je už predtým spomenutý výskyt korózie na spodných vodorovných plochách krčných L profilov obr. 4.1.

tab.4.1 Mosty s popisom korózneho napadnutia pozdĺžnikov z revízných správ

p.č.	km poloha	popis OK	výška	dĺžka	popis korózie	
1	3,009	OK priehr.	447	3300	úbytok na horných pásoch pozdĺžnikov do 15%	
2	3,688	OK pln.	360	2000	lokálne úbytky miesta spoja priečnik - pozdĺžnik (v pripojení na priečnik č.1 sú skorodované dolné krčné uholníky ľavého pozdĺžnika, vplyvom hĺbkovej korózie je úbytok materiálu 100 %)	
3	281,056	OK pln.	430	1560	na pozdĺžnikoch a hlavných pásoch je vplyvom korózie úbytok materiálu cca 20%	
4	most č.03	11,043	OK pln.	330	2100	na pozdĺžnikoch je vplyvom korózie úbytok materiálu cca 25%
5	most č.08	12,852	OK priehr.	395	2650	v zmysle STN 4628-3 je na OK stupeň zhrdzavenia Ri1, na celkovej ploche 15%
6	32,115	OK pln.	450	2050	vľavo sú nad podružným ložiskom skorodované dolné krčné uholníky posledného priečnika, ľavého pozdĺžnika, dolné stuženie, prípojný plech a hlavy nitov, vplyvom hĺbkovej korózie je úbytok materiálu 30%,	
7	7,814	OK priehr.	620	3850	vpravo je skorodovaná dolná časť steny pozdĺžnika, vplyvom hĺbkovej korózie je úbytok materiálu 50%,	
8	27,302	OK pln.	390	2780	nad podružnými ložiskami sú skorodované dolné prípojné plechy, dolné pásy pozdĺžnikov, aj hlavy nitov, vplyvom lokálnej korózie je úbytok materiálu 10%	
9	1,740	OK pln.	570	2000	OK nie je zo spodnej časti natretá ochranným náterom, vplyvom korózie úbytok materiálu cca 15%, v zmysle STN 4628-3 je stupeň zhrdzavenia Ri 2, na oboch koncoch mosta je na krčných uholníkoch pozdĺžnikov a priečnikov vplyvom korózie úbytok materiálu cca 15 %	
10	58,795	OK pln.	400	2000	korózia dolných častí pozdĺžnika, stena a krčný uholník	
11	0,360	OK pln.	400	2150	v spodnej časti pozdĺžnikov korodujú krčné uholníky, vplyvom korózie úbytok materiálu 10%	
12	5,600	OK pln.	370	2350	vo všetkých priehradách vpravo a vľavo je na horných pásoch a dolných krčných uholníkoch pozdĺžnikov aj na hlavách nitov vplyvom hĺbkovej korózie úbytok materiálu 10%,	
13	27,600	OK priehr.	520	3300	v priehradách č. 2.3.4.5.7.8.9.10 vpravo a vo všetkých priehradách vľavo sú skorodované horné pásy pozdĺžnikov aj hlavy nitov, vplyvom hĺbkovej korózie je úbytok materiálu 50%,	
14	23,896	OK priehr.	750	5100	vpravo je na dolnom páse pozdĺžnika v pripojení dolného prípojného plechu mostovkového stuženia na dolný pás pozdĺžnika vplyvom štrbinovej korózie rozvrstvenie materiálu dôsledkom čoho dochádza k deformácii pripojených prvkov	

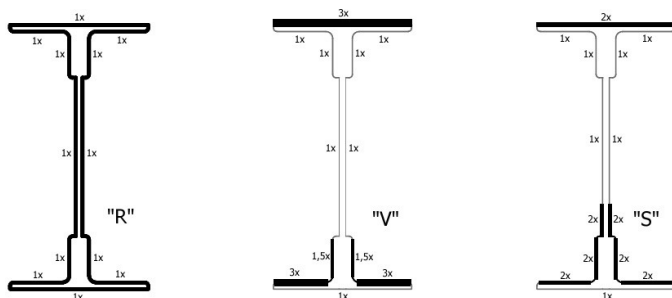
Zväčša to má za následok znečistenie oceleovej konštrukcie rôznym abrazívom (piesok, štrk, prach, uhlie, železná ruda) vozeným po trati v otvorených vozňoch, ktorý zapríčiňoval usadenie na vodorovných častiach. Vrchné časti (pásnice) boli zväčša omývané zrážkami, lebo sú priamo zvrchu z veľkej časti odkryté.



obr. 4.1 Detail napojenia L na stenu

Tento efekt bol menej výrazný na spodných častiach pozdĺžnikov, kde sa tieto častice usadzovali a pôsobili v ranom štádiu ako abrazívum na PKO a v neskorších štádiách ako

„špongia“ pre zrážky a rosu, ktoré predlžovali čas vysušania a tým nepriamo pôsobili na predlžovanie času korózie.



obr. 4.1 Modely „R“, „V“ a „S“ korózie po obvode a jej násobky.

Tento jav sa zohľadnil aj v ďalšej predikcii toho, kde sa bude korózia častejšie a skôr vyskytovať – predlžuje sa čas vysychania tohto detailu konštrukcie a tým sa aj zväčšuje korozívny úbytok. Ani merania neukázali presne, aký dopad to na existujúce konštrukcie má. Príspevok [3] [12], ktorý sa zaoberá cestnými mostami s oceľami so zvýšenou odolnosťou proti atmosférickej korózii detailnejšie špecifikuje koróziu podľa umiestnenia prvku či plochy v konštrukcii a rôznych činiteľov pôsobenia. Nie je možné experimentálne určiť váhu, ktorá časť rýchlejšie koroduje, preto boli zvolené dva modely nerovnomernej rýchlosti korózie po obvode na pozdĺžniku. Prvý model, model „S“ bol zvolený tak, že všetky vodorovné plochy zvrchu korodujú dvakrát rýchlejšie ako zvyšok konštrukcie a k takémuto modelu bola priradená štvornásobná korózia steny v spodnej časti steny (1/5 výšky voľnej steny) obr. 4.1. Druhý model, model „V“ bol zvolený tak, že vodorovná vrchná časť prierezu koroduje dvojnásobne rýchlo a spodné L profile korodujú tak, že ich vodorovná časť koroduje trojnásobne rýchlo a rameno pri stene dvojnásobne rýchlo oproti zvyšnej časti prierezu. Samozrejmosťou je aj model kde celý prierez koroduje rovnomerne po celom obvode (model „R“).

4.2 Aplikácia korózných modelov

Korózne modely sú pravdepodobnostné okrem modelu Guades-Southwel. Počítané boli pomocou simulácii za základe vzťahov z tab. 4.2. Deterministický model bol počítaný s nominálnymi hodnotami. Pre pravdepodobnostné modely bolo zvolených počet simulácií 5000. Prierezy boli počítané pre oslabenia „R“, „V“ a „S“ podľa obr. 4.1.

tab. 4.2 Vzťahy pre výpočet

Autor	Stredná hodnota [mm]	smerodajná odchýlka [mm]	rozdelenie
Frangopol	$0,03207 \cdot t^{0,5}$	$0,0028984 \cdot t^{0,045}$	normálne
Melchers-Southwe	$0,084 \cdot t^{0,823}$	$0,056 \cdot t^{0,823}$	normálne
Guades Soares	$d_{\text{coor}}(t) = 1,5 \cdot [1 - e^{(-t/10)}]$	čas uvádzaný v rokoch	-
Qui-Cui	$1,67 \cdot [1 - \exp(-t/9,15)]^{1,97}$	$1,0674 \cdot [1 - \exp(-t/0,181)]^{0,0294}$	normálne
normový do 20r.	$d_{\text{coor}}(t) = 1,5 \cdot [1 - e^{(-t/10)}]$	0,026	
nad 20r.	$d_{\text{coor}}(t) = r_{\text{coor}} \cdot [20^b + b(20^{b-1})(t-20)]$	0,026	

Čas pôsobenia korózie bol zvolený na 1, 5, 10, 20 rokov. Pre prierez pozdĺžnika mosta č.03 bola spustená simulácia v týchto kombináciách: 4 korózne modely, 3 varianty prierezu, 4 rôzne časy pôsobenia a jeden nomimálny výpočet pre korózný model Guades-Southwel pre 3 varianty prierezu, 4 rôzne časy pôsobenia.

Čiastočné výsledky:

tab. 4.3 model Frangopol

čas	schéma oslabenia	Frangopol			
		%N _{rd}	%M _{y,Rd}	%M _{z,Rd}	%V _{z,Rd}
20	R	99,7	99,7	99,6	99,6
	V	97,4	96,4	96,0	98,1
	S	97,9	97,2	96,9	97,6

tab. 4.4 model Melcher-Southwell

čas	schéma oslabenia	Melcher-Southwell			
		%N _{rd}	%M _{y,Rd}	%M _{z,Rd}	%V _{z,Rd}
20	R	98,7	98,6	98,0	98,3
	V	75,0	58,9	57,5	81,2
	S	79,7	68,5	67,8	74,8

tab. 4.5 model Guades Soares

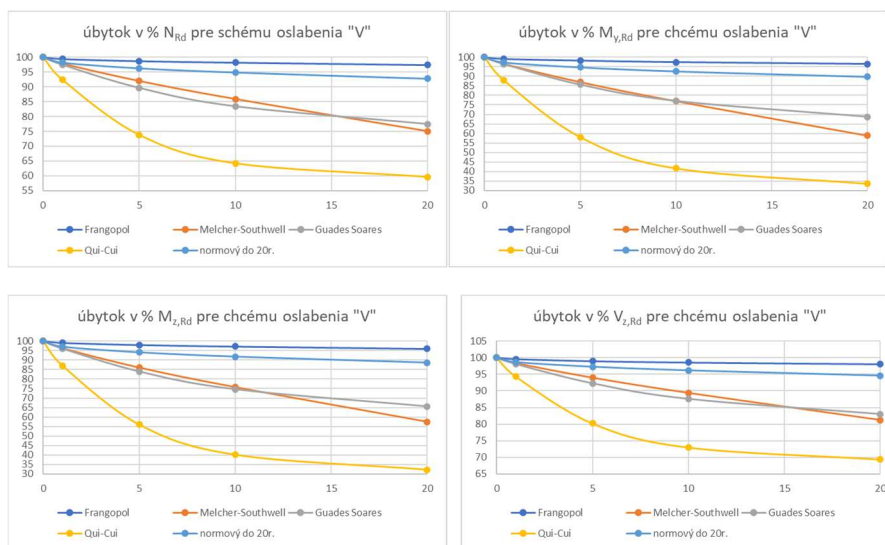
schéma	čas	%N _{rd}	%M _{y,Rd}	%M _{z,Rd}	%V _{z,Rd}	%N _{rd}	%M _{y,Rd}	%M _{z,Rd}	%V _{z,Rd}
R	0	3083,89	234,35	42,14	1164,11	100,0	100,0	100,0	100,0
	1	3041,73	231,35	41,39	1145,52	98,6	98,7	98,2	98,4
	5	2909,90	221,96	39,04	1087,24	94,4	94,7	92,6	93,4
	10	2804,84	214,49	37,20	1040,61	91,0	91,5	88,3	89,4
	20	2702,83	207,25	35,43	995,18	87,6	88,4	84,1	85,5
V	0	3083,89	234,35	42,14	1164,11	100,0	100,0	100,0	100,0
	1	3006,77	226,18	40,50	1142,39	97,5	96,5	96,1	98,1
	5	2765,92	200,67	35,41	1074,27	89,7	85,6	84,0	92,3
	10	2574,32	180,38	31,42	1019,77	83,5	77,0	74,6	87,6
	20	2388,57	160,71	27,60	966,67	77,5	68,6	65,5	83,0
S	0	3083,89	234,35	42,14	1164,11	100,0	100,0	100,0	100,0
	1	3019,41	228,02	40,88	1137,04	97,9	97,3	97,0	97,7
	5	2817,85	208,19	36,95	1052,16	91,4	88,8	87,7	90,4
	10	2657,28	192,34	33,87	984,26	86,2	82,1	80,4	84,6
	20	2501,41	176,93	30,92	918,10	81,1	75,5	73,4	78,9

Tab. 4.6 model Qui-Cui

čas		"R"				"V"				"S"			
		%N _{rd}	%M _{y,Rd}	%M _{z,Rd}	%V _{z,Rd}	%N _{rd}	%M _{y,Rd}	%M _{z,Rd}	%V _{z,Rd}	%N _{rd}	%M _{y,Rd}	%M _{z,Rd}	%V _{z,Rd}
1	stred.hodn.	2989,25	227,58	40,45	1122,28	2908,25	215,78	38,41	1114,82	2937,44	219,96	39,27	1102,57
	smer.odch.	25,14	2,68	0,65	15,45	35,93	5,86	1,03	10,04	26,54	4,29	0,74	15,19
	kvantil 5%	2947,90	223,17	39,38	1096,87	2849,14	206,14	36,72	1098,31	2893,78	212,90	38,06	1077,58
	nominal	3083,89	234,35	42,14	1164,11	3083,89	234,35	42,14	1164,11	3083,89	234,35	42,14	1164,11
	%	95,6	95,2	93,5	94,2	92,4	88	87,1	94,3	93,8	90,8	90,3	92,6
5	stred.hodn.	2759,55	211,34	36,39	1020,61	2491,72	171,70	29,73	995,98	2588,18	185,18	32,54	956,05
	smer.odch.	56,44	5,94	1,44	34,89	131,17	21,59	3,71	37,77	100,28	16,51	2,73	56,65
	kvantil 5%	2666,71	201,58	34,03	963,21	2275,94	136,18	23,62	933,85	2423,22	158,02	28,06	862,86
	nominal	3083,89	234,35	42,14	1164,11	3083,89	234,35	42,14	1164,11	3083,89	234,35	42,14	1164,11
	%	86,5	86	80,8	82,7	73,8	58,1	56	80,2	78,6	67,4	66,6	74,1
10	stred.hodn.	2651,37	203,55	34,53	970,49	2294,67	150,16	25,67	939,39	2420,44	168,92	29,42	882,71
	smer.odch.	81,36	8,56	2,05	50,71	190,88	31,84	5,32	54,13	141,13	23,78	3,83	81,09
	kvantil 5%	2517,53	189,47	31,16	887,07	1980,67	97,78	16,92	850,34	2188,28	129,80	23,13	749,33
	nominal	3083,89	234,35	42,14	1164,11	3083,89	234,35	42,14	1164,11	3083,89	234,35	42,14	1164,11
	%	81,6	80,8	74	76,2	64,2	41,7	40,1	73	71	55,4	54,9	64,4
20	stred.hodn.	2601,86	200,21	33,66	948,99	2199,82	139,24	23,71	914,33	2348,34	161,02	28,06	852,43
	smer.odch.	96,21	10,33	2,44	60,67	219,95	36,78	1,16	64,95	168,97	28,60	4,53	95,92
	kvantil 5%	2443,59	183,23	29,64	849,20	1838,00	78,73	13,57	807,50	2070,38	113,97	20,62	694,63
	nominal	3083,89	234,35	42,14	1164,11	3083,89	234,35	42,14	1164,11	3083,89	234,35	42,14	1164,11
	%	79,2	78,2	70,3	72,9	59,6	33,6	32,2	69,4	67,1	48,6	48,9	59,7

Tab. 4.7 Výpočet podľa STN EN ISO 9233

čas		"R"				"V"				"S"			
		%N _{Rd}	%M _{y,Rd}	%M _{z,Rd}	%V _{z,Rd}	%N _{Rd}	%M _{y,Rd}	%M _{z,Rd}	%V _{z,Rd}	%N _{Rd}	%M _{y,Rd}	%M _{z,Rd}	%V _{z,Rd}
1	str.hodn.	3059,36	232,61	41,70	1153,35	3039,13	229,59	41,19	1151,52	3046,36	230,67	41,41	1148,36
	smer.odch.	4,064	0,426	0,105	2,525	5,746	0,928	0,167	1,647	4,284	0,689	0,120	2,457
	kvantil 5%	3052,68	231,91	41,53	1149,19	3029,68	228,06	40,91	1148,81	3039,32	229,54	41,21	1144,32
	nominal	3083,89	234,35	42,14	1164,11	3083,89	234,35	42,14	1164,11	3083,89	234,35	42,14	1164,11
	%	99	99	98,5	98,7	98,2	97,3	97,1	98,7	98,6	97,9	97,8	98,3
5	str.hodn.	3027,14	230,31	41,13	1139,10	2980,03	223,36	39,93	1134,81	2997,09	225,82	40,44	1127,63
	smer.odch.	2,479	0,262	0,064	1,547	5,801	0,923	0,168	1,626	4,243	0,687	0,119	2,475
	kvantil 5%	3023,06	229,88	41,02	1136,56	2970,49	221,84	39,66	1132,14	2990,11	224,69	40,24	1123,56
	nominal	3083,89	234,35	42,14	1164,11	3083,89	234,35	42,14	1164,11	3083,89	234,35	42,14	1164,11
	%	98	98,1	97,3	97,6	96,3	94,7	94,1	97,3	97	95,9	95,5	96,5
10	str.hodn.	3002,40	228,54	40,68	1128,18	2934,90	218,57	38,98	1122,14	2959,29	222,11	39,70	1111,75
	smer.odch.	2,458	0,263	0,064	1,535	5,760	0,913	0,167	1,644	4,223	0,677	0,118	2,437
	kvantil 5%	3023,06	229,88	41,02	1136,56	2970,49	221,84	39,66	1132,14	2990,11	224,69	40,24	1123,56
	nominal	3083,89	234,35	42,14	1164,11	3083,89	234,35	42,14	1164,11	3083,89	234,35	42,14	1164,11
	%	97,2	97,3	96,3	96,7	94,9	92,6	91,8	96,2	95,7	94,3	93,7	95,2
20	str.hodn.	2966,77	226,01	40,05	1112,45	2869,94	211,71	37,60	1103,71	2904,97	216,76	38,64	1088,91
	smer.odch.	2,454	0,262	0,064	1,543	5,677	0,928	0,162	1,623	4,294	0,686	0,120	2,429
	kvantil 5%	2962,74	225,58	39,94	1109,91	2860,60	210,19	37,34	1101,04	2897,91	215,63	38,44	1084,91
	nominal	3083,89	234,35	42,14	1164,11	3083,89	234,35	42,14	1164,11	3083,89	234,35	42,14	1164,11
	%	96,1	96,3	94,8	95,3	92,8	89,7	88,6	94,6	94	92	91,2	93,2

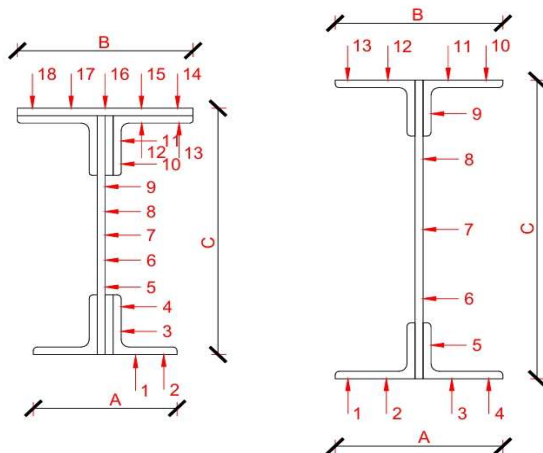
obr. 4.2 Porovnanie korozných modelov pre zložky oslabenia N_{Rd} , $M_{y,Rd}$, $M_{z,Rd}$, $V_{z,Rd}$ pre prierez oslabenia „V“

4.3 Meranie prierezov vybraných mostov a ich vyhodnotenie

Uskutočnili sa merania na existujúcich mostoch pre zistenie plošnej korózie. Jednalo sa o dva mosty na trati Žilina – Rajec - v km 11,043 a 12,852. Ani meraním sa nedokázalo zistiť či variabilita hrúbky je spôsobená koróziou alebo samotnou výrobou – valcovaním, pretože

konštrukcia mala celistvý náter a známky korózie neboli viditeľné. Preto boli merania spracované ako štatistický súbor. Prierez bol rozdelený na základné prvky, pre ktoré boli merané hrúbky. Spodný a vrchný uholník ako hrúbka vodorovného ramena tak aj zvislého ramena samostatne. Tak isto bola meraná stena pozdĺžnika a vrchná pásnica. Boli zmerané aj základné rozmery ako je šírka horného pásu, spodného pásu a výška celého prierezu pozdĺžnika. Schéma merania je na obrázku 4.3. Meranie hrúbok bolo robené pomocou prístroja od fa. INNERSPEC Coda – princíp fungovania EMAT. Pri každom meraní bola vykonaná kalibrácia na samotnej konštrukcii a prístroj bol kalibrovaný na presný rozmer podobný hrúbke meraných častí. Rozmery konštrukcie boli merané kalibrovaným posuvným meradlom INSIZE s rozsahom 0-500mm s presnosťou 0,01mm.

Údaje boli zoradené a prehľadne doplnené o meranie hrúbok a štatisticky spracované. Na základe štatistických hrúbok a rozmerov, boli vložené do predom pripraveného softwaru EXCEL s dodatočnými skriptami, kde boli prevedené simulácie rôznych prierezov. Hrúbka a rozmery boli definované štatistickými hodnotami pre každý prierez - spodný uholník, stena a horný uholník samostatne.



4.3 Schéma merania vybratých prierezov pozdĺžnikov mostov most č.03 a č.08

Bolo nasimulovaných 30 000 rôznych prierezov so vstupnými štatistickými hodnotami pre každú časť prierezu. Hrúbka a rozmer bol ohraničený strednou hodnotou a smerodajnou odchýlkou. Všetky tieto simulácie prebiehali s použitím scriptu Visual Basic-u. Výsledok celej simulácie bol štatisticky spracovaný a boli stanovené stredné hodnoty a smerodajné odchýlky pre zložky odolnosti prierezu, tlaková sila N_{Rd} , ohybový moment $M_{y,Rd}$, $M_{z,Rd}$ a šmyková sila $V_{z,Rd}$.

Čiastkové výsledky:

Tab.4.8 Výsledky most 03

most 03	N_{Rd}	$M_{y,Rd}$	$M_{z,Rd}$	$V_{z,Rd}$
max	3292,18	247,82	47,53	1217,89
min	3121,09	229,82	43,61	1138,84
st.hodn	3200,02	238,84	45,59	1178,96
u	20,02	2,28	0,48	8,45
1,645u	32,93	3,75	0,79	13,90
3,8u	76,07	8,67	1,83	32,10
quantil 5%	3167,09	235,08	44,80	1165,06
quantil 0,1%	3123,95	230,16	43,76	1146,85
nominal	3083,89	234,35	42,14	1164,11
% quantil 5%	102,70	100,31	106,30	100,08
% quantil 0,1%	101,30	98,21	103,84	98,52

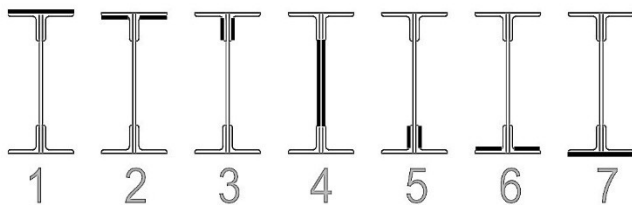
Tab.4.9 Výsledky pre most 08

most 08	N_{Rd}	$M_{y,Rd}$	$M_{z,Rd}$	$V_{z,Rd}$
max	2986,95	340,36	44,46	1583,25
min	2594,44	287,65	35,26	1208,63
st.hodn	2781,18	315,67	39,61	1384,35
u	46,54	6,65	1,21	45,68
1,645u	76,56	10,94	1,99	75,15
3,8u	176,86	25,27	4,60	173,59
quantil 5%	2704,62	304,73	37,62	1309,20
quantil 0,1%	2604,32	290,40	35,01	1210,76
nominal	2548,09	292,80	34,74	1261,80
% quantil 5%	106,14	104,08	108,29	103,76
% quantil 0,1%	102,21	99,18	100,78	95,96

Ako je vidieť z predošlej tabuľky, presné meranie hrúbok a ich štatistické vyhodnotenie dáva presnejší pohľad a v istých prípadoch môže zvýšiť odolnosť prierezu. V našom prípade vzrástli čiastkové hodnoty odolnosti prierezu u mosta č.03 od 0,3 do 6,2% a mosta č.08 od 3,7% do 8,4%. Z prípadov prepočtov mostov, kde boli merané aj pevnosti ocele a boli vyššie ako nominálna, je zrejmé, že aj tieto hodnoty môže mať vplyv na zvýšenie odolnosti prierezu.

5 CITLIVOSTNÁ ANALÝZA DOPADOV RÔZNE SILNEJ KORÓZIE NA RÔZNYCH ČASTIACH PRIEREZU NA ODOLNOSŤ POZDĹŽNIKOV.

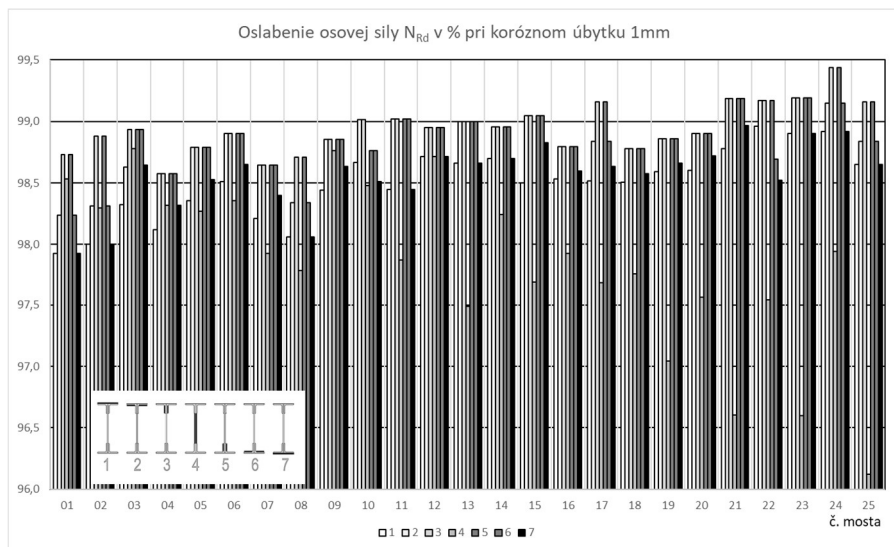
Na analýzu prierezov bolo použitých 25 prierezov s premenlivou výškou podľa tab.3.2 Uplatnený bol algoritmus, ktorý nezahŕňal časovú závislosť na úbytok korózie cez modely korózie ale priamo úbytok hrúbky na prierez pozdĺžnika. Prierez pozdĺžnika sa rozdelil na sedem rôznych plôch podľa obr. 5.1 . Výpočet opäť prebiehal pomocou skriptu písaného vo Visual Basicu a prierezy boli rozdelené podľa variantov prierezu na A, B alebo C obr. 3.3, podľa toho či mal pridanú hornú alebo aj dolnú pásnicu. Za premennú sa doplňal údaj, ktorý nahrádzal úbytok danej plochy pre ktorú bol prierez počítaný. Úbytok materiálu bol zvolený v rozsahu 0 – 4 mm s krokom 0,1mm. Získané a uložené údaje odolnosti prierezu vyjadrené pomocou N_{Rd} , $M_{y,Rd}$, $M_{z,Rd}$, $V_{z,Rd}$ boli pre každý prierez mosta, každú časť plochy prierezu a rôzny úbytok príslušnej plochy.

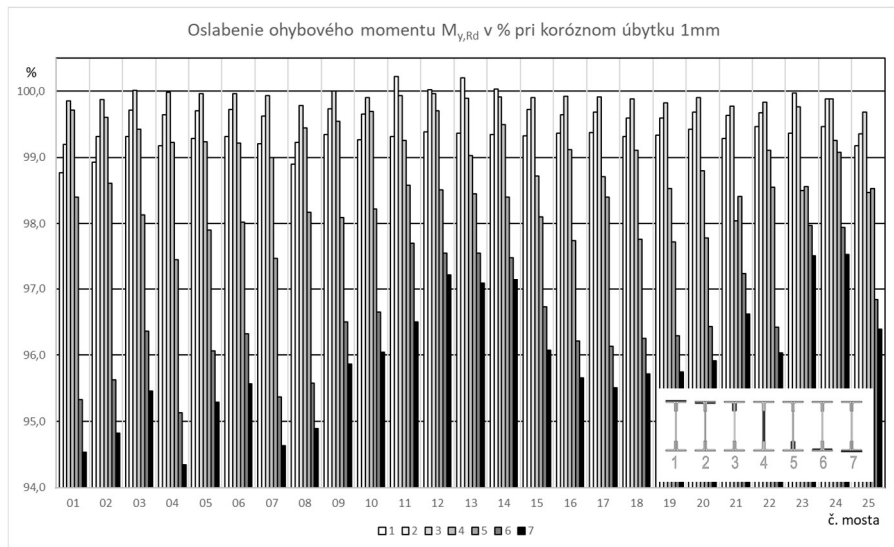
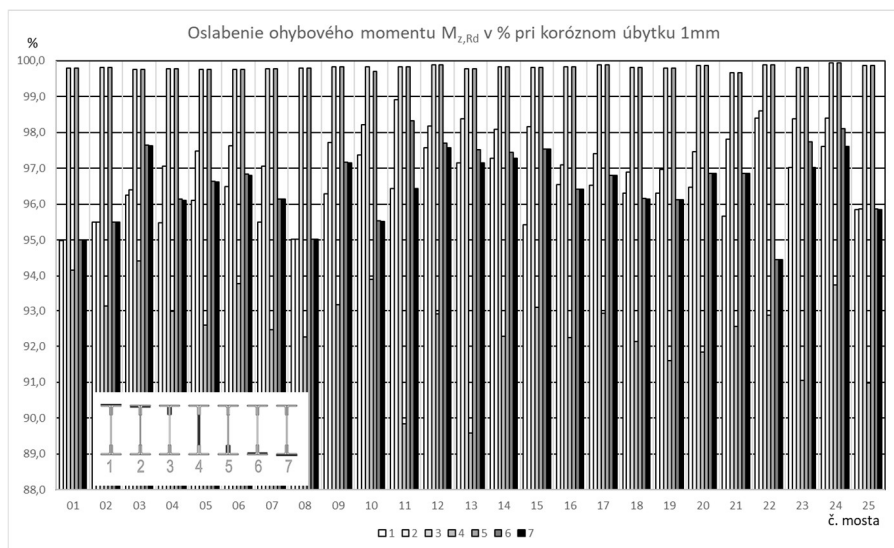


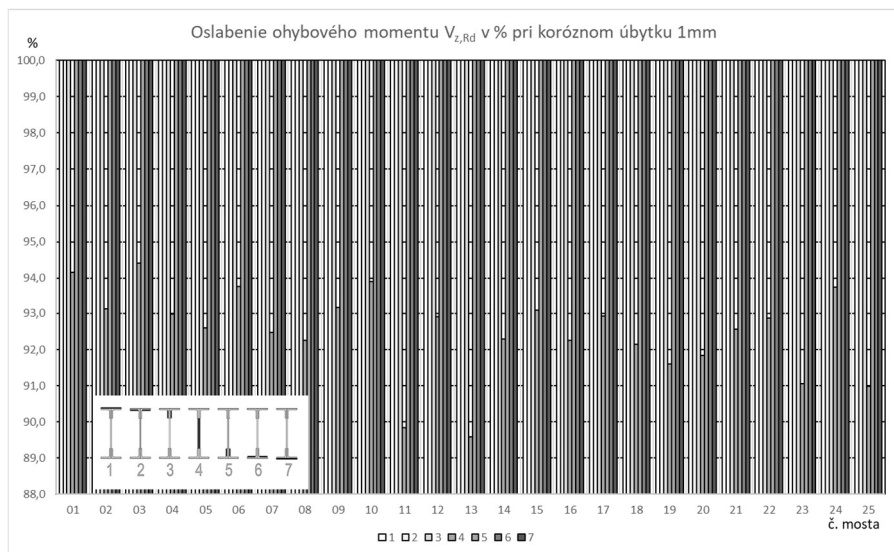
obr. 5.1 Rozdelenie povrchu na časti prierezu a 7 rôznych plôch oslabenia.

Čiastočné výsledky:

Pretože oslabenia po 20 rokoch výpočtovo dosahovali okolo 1 mm podľa normy, zo všetkých prierezov boli vybraté hodnoty percentuálneho oslabenia pri 1mm. Vyhodnotenie bolo urobené v grafoch **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov., Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov., obr. a Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.** pre každú zložku oslabenia zvlášť, tak ako aj pre každý prierez. Z grafu **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.** pre osovú silu vyplýva, že prierezy s vysokou stenou, červená krivka, oslabujú najväčšou plochou a teda ich celkový dopad na zložku únosnosti prierezu v osovej sile je najvýraznejší. Percentuálne však nie väčší ako 4% u vysokých prierezov. Ostatné rozmiestnenie korózie po priereze je do 2% samostatne. Pre ohybový moment kolmo na rovinu y, $M_{y,Rd}$ je rozhodujúce oslabenie dolnej pásnice, či už zospodu, alebo spodného profilu L zhora, ktoré vytvára ešte väčšiu nesymetriu prierezu a posúva neutrálnu os smerom hore čo má za následok zníženie únosnosti o 6% V ostatných prípadoch sa znižuje do 2,6%. Na tento jav sú najviac náchylné prierezy variantu „A“ a „B“. Paradoxom sú dva prierezy typu „B“ s mohutnou vrchnou násnicou a malými profilmi uholníkov L70x70x10, pri ktorých sa úbytkom na horom L profile pri pásnici zvyšujem ohybový moment $M_{y,Rd}$. Je to zapríčinené tým, že výška prierezu sa nemení a neutrálna os sa posúva bližšie ku geometrickému stredy, čím sa zväčšuje rameno a prierez v elastickom momente sa zvyšuje. Pre ohybový moment kolmo na rovinu z $M_{z,Rd}$ sú rozhodujúce oslabenia pásnic, či už horných alebo dolných, tak isto aj ramená profilov L v rozmedzí 2% - 5,5%. Plocha uholníkov pri stene a samotná stena má iba pomerne malý vplyv rádovo do 0,5%. Pri priečnej sile je opačný efekt, nakoľko je počítaná z plochy steny, má zásadný vplyv na jej odolnosť prierezu oslabenie steny. Najväčší vplyv to má u tenších stien hrúbky 8mm, prierez č. 11 a 13, úbytok odolnosti do 11% a vysokých stien hrúbky 10mm, u prierezov č.23 a 25, úbytok odolnosti do 9%, ostatné prípady okolo 8%



obr.5.2 Zníženie N_{Rd} pri oslabení 1mm v rôznych miestach prierezu**obr. 5.3 Zníženie $M_{y,Rd}$ pri oslabení 1mm v rôznych miestach prierezu****obr. 5.4 Zníženie $\%M_{z,Rd}$ pri oslabení 1mm v rôznych miestach prierezu**

obr 5.5 Zníženie % $V_{z,Rd}$ pri oslabení 1mm v rôznych miestach prierezu

6 MOŽNÁ PREDIKCIA VÝVOJA ZAŤAŽITELNOSTI STARÝCH POZDĽŽNIKOV V RÁMCI ŽSR

Vzorka mostov, ktorá bola vybraná pre štúdiu vplyvu normovej atmosférickej korózie odzrkadľuje dopad novej korózie na existujúcich mostoch podľa súčasne platnej legislatívy. Pokiaľ by sme nebrali do úvahy aj iné faktory, ktoré na koróziu vplyvajú, umiestnenie, vplyv okolitého prostredia, biologického typu ako sú stromy, alebo vplyv machov, prípade umiestnenie z titulu trate, po ktorých sa vozi železná ruda alebo uhlie, môžeme konštatovať, že korózia má menší dopad na oslabenie prierezu než sa bežne predpokladá. Z počítaných prierezov a definovaného času je možné určiť v akých hraniciach sa bude pravdepodobne korózia nachádzať a predikovať oslabenie prierezu z pohľadu odolnosti. Samotný výpočet prebiehal na základe vstupných údajov: číslo prierezu, k nemu príslušné parametre prierezu, oslabenie po priereze typ „R“, „V“, „S“, korózne prostredie C2,C3,C4, meniaci sa čas od 0 – 20 rokov. Nakoľko mosty v správe ŽSR majú všetky SPKO, ktorá sa periodicky opravuje, je iba málo mostov, ktoré majú celý prierez vystavený korózii dlhšie ako 20 rokov. Preto bola aj hranica volená 20 rokov. Druhým dôvodom je, že mosty, ktoré sú v správe ŽSR sú zväčša z predvojnového alebo povojnového obdobia teda okolo 60-80 rokov a zostatková životnosť často nie je ani tých dvadsať rokov. Tretím dôvodom prečo je volená doba 20 rokov je životnosť PKO, ktorá pri dnešných náterových hmotách sa odhaduje na 15-30 rokov, v závislosti od použitého materiálu a technológie. Ďalším dôvodom je plánovanie výmeny starých mostov, ktoré je často od naplánovania výmeny po realizáciu tri a viac rokov, no nie však viac ako 20 rokov. Výpočty vygenerovali výsledky pre každý jeden most a sú členené podľa predošlých vstupných údajov

Čiastočné závery:

tab. 6.1 Zložky odolnosti pre 20 rokov pre oslabenie „R“

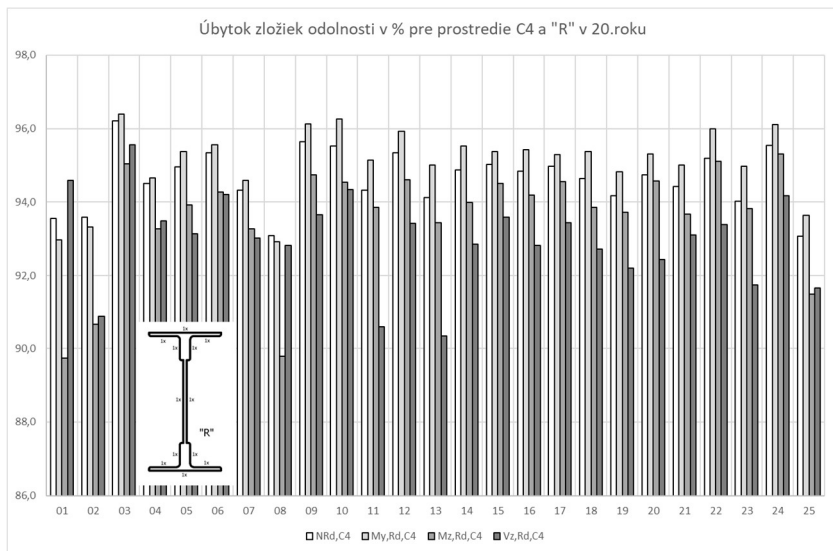
most č.	N _{Rd}			M _{y,Rd}			M _{z,Rd}			V _{z,Rd}		
	N _{Rd,C2}	N _{Rd,C3}	N _{Rd,C4}	M _{y,Rd,C2}	M _{y,Rd,C3}	M _{y,Rd,C4}	M _{z,Rd,C2}	M _{z,Rd,C3}	M _{z,Rd,C4}	V _{z,Rd,C2}	V _{z,Rd,C3}	V _{z,Rd,C4}
01	98,0	96,0	93,6	97,8	95,7	93,0	96,8	93,6	89,7	98,3	96,7	94,6
02	98,0	96,1	93,6	97,9	95,9	93,3	97,1	94,2	90,7	97,2	94,4	90,9
03	98,8	97,7	96,2	98,9	97,8	96,4	98,5	96,9	95,0	98,6	97,3	95,6
04	98,3	96,6	94,5	98,4	96,7	94,7	97,9	95,8	93,3	98,0	96,0	93,5
05	98,4	96,9	95,0	98,6	97,2	95,4	98,1	96,2	93,9	97,9	95,8	93,1
06	98,6	97,1	95,3	98,6	97,3	95,6	98,2	96,5	94,3	98,2	96,4	94,2
07	98,3	96,5	94,3	98,3	96,7	94,6	97,9	95,8	93,3	97,9	95,7	93,0
08	97,9	95,7	93,1	97,8	95,6	92,9	96,8	93,7	89,8	97,8	95,6	92,8
09	98,7	97,3	95,6	98,8	97,6	96,1	98,4	96,7	94,7	98,0	96,1	93,7
10	98,6	97,2	95,5	98,8	97,7	96,3	98,3	96,6	94,5	98,3	96,5	94,3
11	98,3	96,5	94,3	98,5	97,0	95,1	98,1	96,2	93,8	97,1	94,2	90,6
12	98,6	97,1	95,3	98,7	97,5	95,9	98,3	96,7	94,6	98,0	96,0	93,4
13	98,2	96,4	94,1	98,5	96,9	95,0	98,0	96,0	93,4	97,0	94,1	90,3
14	98,4	96,8	94,9	98,6	97,2	95,5	98,1	96,3	94,0	97,8	95,6	92,8
15	98,5	96,9	95,0	98,6	97,2	95,4	98,3	96,6	94,5	98,0	96,1	93,6
16	98,4	96,8	94,8	98,6	97,2	95,4	98,2	96,4	94,2	97,8	95,6	92,8
17	98,4	96,9	95,0	98,6	97,1	95,3	98,3	96,6	94,6	98,0	96,0	93,4
18	98,3	96,7	94,6	98,6	97,2	95,4	98,1	96,2	93,8	97,8	95,5	92,7
19	98,2	96,4	94,2	98,4	96,8	94,8	98,1	96,1	93,7	97,6	95,2	92,2
20	98,4	96,8	94,7	98,6	97,1	95,3	98,3	96,6	94,6	97,7	95,3	92,4
21	98,3	96,6	94,4	98,5	96,9	95,0	98,0	96,1	93,7	97,9	95,8	93,1
22	98,5	97,0	95,2	98,8	97,5	96,0	98,5	97,0	95,1	98,0	95,9	93,4
23	98,2	96,3	94,0	98,5	96,9	95,0	98,1	96,2	93,8	97,4	94,9	91,7
24	98,6	97,3	95,5	98,8	97,6	96,1	98,6	97,1	95,3	98,2	96,4	94,2
25	97,9	95,7	93,1	98,0	96,1	93,6	97,4	94,7	91,5	97,4	94,9	91,6
min	97,9	95,7	93,1	97,8	95,6	92,9	96,8	93,6	89,7	97,0	94,1	90,3
max	98,8	97,7	96,2	98,9	97,8	96,4	98,6	97,1	95,3	98,6	97,3	95,6
rozdiel	1,0	1,9	3,1	1,1	2,1	3,5	1,7	3,5	5,6	1,6	3,2	5,2

tab.6.2 Zložky odolnosti pre 20 rokov pre oslabenie „S“

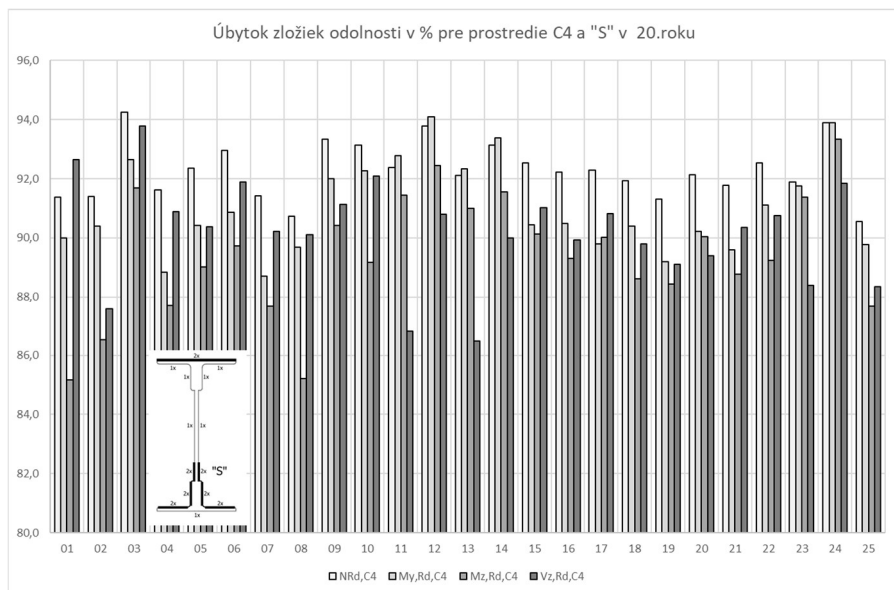
most č.	N _{Rd}			M _{y,Rd}			M _{z,Rd}			V _{z,Rd}		
	N _{Rd,C2}	N _{Rd,C3}	N _{Rd,C4}	M _{y,Rd,C2}	M _{y,Rd,C3}	M _{y,Rd,C4}	M _{z,Rd,C2}	M _{z,Rd,C3}	M _{z,Rd,C4}	V _{z,Rd,C2}	V _{z,Rd,C3}	V _{z,Rd,C4}
01	97,3	94,7	91,4	96,9	93,8	90,0	95,4	90,8	85,2	97,7	95,5	92,6
02	97,4	94,7	91,4	97,1	94,1	90,4	95,8	91,7	86,5	96,2	92,4	87,6
03	98,2	96,5	94,3	97,7	95,5	92,6	97,4	94,9	91,7	98,1	96,2	93,8
04	97,4	94,8	91,6	96,6	93,1	88,8	96,2	92,4	87,7	97,2	94,4	90,9
05	97,6	95,3	92,3	97,1	94,1	90,4	96,6	93,2	89,0	97,0	94,1	90,4
06	97,8	95,7	93,0	97,2	94,4	90,9	96,8	93,6	89,7	97,5	95,0	91,9
07	97,4	94,7	91,4	96,5	93,1	88,7	96,2	92,4	87,7	97,0	94,0	90,2
08	97,1	94,3	90,7	96,8	93,7	89,7	95,4	90,8	85,2	97,0	93,9	90,1
09	97,9	95,9	93,3	97,5	95,1	92,0	97,0	94,1	90,4	97,3	94,5	91,1
10	97,9	95,8	93,1	97,6	95,2	92,3	96,7	93,3	89,2	97,6	95,1	92,1
11	97,6	95,3	92,4	97,8	95,6	92,8	97,3	94,7	91,4	95,9	91,9	86,8
12	98,1	96,2	93,8	98,2	96,4	94,1	97,7	95,3	92,4	97,2	94,3	90,8
13	97,6	95,1	92,1	97,6	95,3	92,3	97,2	94,4	91,0	95,8	91,7	86,5
14	97,9	95,8	93,1	98,0	95,9	93,4	97,4	94,8	91,6	96,9	93,8	90,0
15	97,7	95,4	92,5	97,1	94,1	90,4	97,0	93,9	90,1	97,2	94,5	91,0
16	97,6	95,2	92,2	97,1	94,1	90,5	96,7	93,4	89,3	96,9	93,8	89,9
17	97,6	95,3	92,3	96,9	93,7	89,8	96,9	93,8	90,0	97,2	94,3	90,8
18	97,5	95,0	91,9	97,0	94,1	90,4	96,5	93,0	88,6	96,9	93,7	89,8
19	97,3	94,6	91,3	96,7	93,4	89,2	96,4	92,9	88,4	96,6	93,3	89,1
20	97,6	95,2	92,1	97,0	94,0	90,2	96,9	93,8	90,0	96,7	93,5	89,4
21	97,5	94,9	91,8	96,8	93,6	89,6	96,5	93,1	88,8	97,0	94,1	90,3
22	97,7	95,4	92,5	97,3	94,5	91,1	96,7	93,3	89,2	97,2	94,3	90,7
23	97,5	95,0	91,9	97,5	94,9	91,8	97,3	94,7	91,4	96,4	92,9	88,4
24	98,1	96,2	93,9	98,1	96,2	93,9	97,9	95,9	93,3	97,5	95,0	91,8
25	97,1	94,2	90,5	96,9	93,7	89,8	96,2	92,4	87,7	96,4	92,8	88,3
min	97,1	94,2	90,5	96,5	93,1	88,7	95,4	90,8	85,2	95,8	91,7	86,5
max	98,2	96,5	94,3	98,2	96,4	94,1	97,9	95,9	93,3	98,1	96,2	93,8
rozdiel	1,1	2,3	3,7	1,7	3,3	5,4	2,5	5,0	8,2	2,2	4,5	7,3

tab. 6.3 Zložky odolnosti pre 20 rokov pre oslabenie „V“

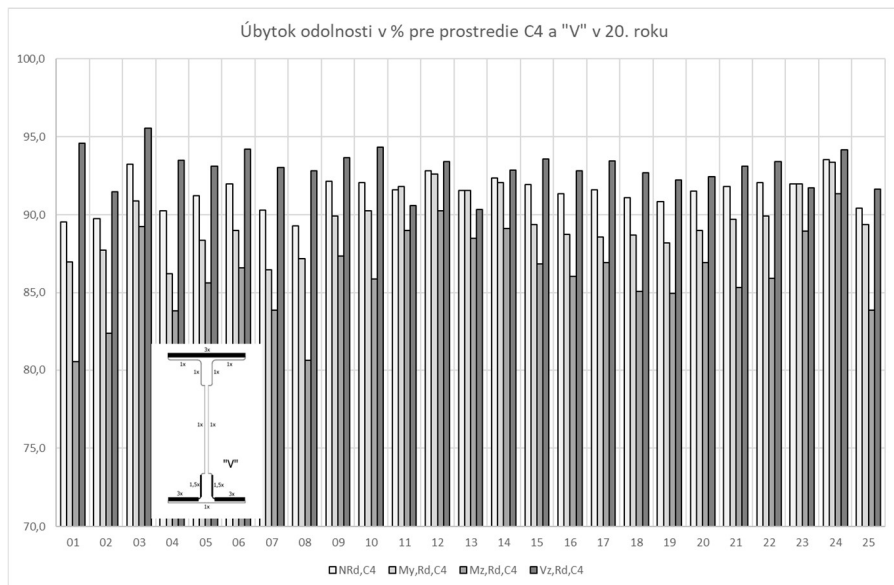
tabuľka pre 20 rokov "V" - 2x vodorovné časti a dolný uholník 2x												
most č.	N _{Rd}			M _{y,Rd}			M _{z,Rd}			V _{z,Rd}		
	N _{Rd,C2}	N _{Rd,C3}	N _{Rd,C4}	M _{y,Rd,C2}	M _{y,Rd,C3}	M _{y,Rd,C4}	M _{z,Rd,C2}	M _{z,Rd,C3}	M _{z,Rd,C4}	V _{z,Rd,C2}	V _{z,Rd,C3}	V _{z,Rd,C4}
01	96,8	93,6	89,5	96,0	92,0	87,0	94,0	88,0	80,5	98,3	96,7	94,6
02	96,8	93,7	89,7	96,2	92,5	87,7	94,5	89,1	82,3	97,4	94,7	91,5
03	97,9	95,8	93,2	97,2	94,4	90,9	96,7	93,4	89,2	98,6	97,3	95,6
04	97,0	94,0	90,3	95,8	91,5	86,2	95,0	90,0	83,8	98,0	96,0	93,5
05	97,3	94,6	91,2	96,4	92,9	88,4	95,5	91,1	85,6	97,9	95,8	93,1
06	97,5	95,1	92,0	96,6	93,2	89,0	95,9	91,7	86,6	98,2	96,4	94,2
07	97,0	94,0	90,3	95,8	91,7	86,5	95,0	90,0	83,8	97,9	95,7	93,0
08	96,7	93,4	89,3	96,1	92,1	87,2	94,0	88,0	80,6	97,8	95,6	92,8
09	97,6	95,2	92,1	96,9	93,8	89,9	96,1	92,2	87,4	98,0	96,1	93,7
10	97,6	95,1	92,1	97,0	94,0	90,3	95,6	91,3	85,9	98,3	96,5	94,3
11	97,4	94,8	91,6	97,5	95,0	91,8	96,6	93,2	89,0	97,1	94,2	90,6
12	97,8	95,6	92,8	97,7	95,5	92,6	97,0	94,0	90,2	98,0	96,0	93,4
13	97,4	94,8	91,6	97,4	94,8	91,5	96,4	92,9	88,5	97,0	94,1	90,3
14	97,6	95,3	92,4	97,6	95,1	92,1	96,6	93,3	89,1	97,8	95,6	92,8
15	97,5	95,0	91,9	96,7	93,5	89,4	95,9	91,9	86,8	98,0	96,1	93,6
16	97,3	94,7	91,3	96,5	93,1	88,7	95,7	91,4	86,0	97,8	95,6	92,8
17	97,4	94,8	91,6	96,5	93,0	88,6	96,0	91,9	86,9	98,0	96,0	93,4
18	97,3	94,5	91,1	96,5	93,1	88,7	95,4	90,8	85,1	97,8	95,5	92,7
19	97,2	94,4	90,9	96,4	92,7	88,2	95,3	90,7	84,9	97,6	95,2	92,2
20	97,4	94,8	91,5	96,6	93,2	89,0	96,0	91,9	86,9	97,7	95,3	92,4
21	97,5	94,9	91,8	96,8	93,7	89,7	95,5	90,9	85,3	97,9	95,8	93,1
22	97,6	95,1	92,1	96,9	93,8	89,9	95,6	91,3	85,9	98,0	95,9	93,4
23	97,5	95,1	92,0	97,5	95,1	92,0	96,6	93,2	88,9	97,4	94,9	91,7
24	98,0	96,0	93,6	98,0	95,9	93,4	97,3	94,7	91,3	98,2	96,4	94,2
25	97,1	94,1	90,4	96,7	93,5	89,4	95,0	90,0	83,8	97,4	94,9	91,6
min	96,7	93,4	89,3	95,8	91,5	86,2	94,0	88,0	80,5	97,0	94,1	90,3
max	98,0	96,0	93,6	98,0	95,9	93,4	97,3	94,7	91,3	98,6	97,3	95,6
rozdiel	1,3	2,6	4,3	2,2	4,4	7,2	3,4	6,7	10,8	1,6	3,2	5,2



obr. 6.1 Úbytok zložiek odolnosti v % pre C4 a „R“ v čase 20 rokov



obr. 6.2 Úbytok zložiek odolnosti v % pre C4 a „S“ v čase 20 rokov



obr. 6.3 Úbytok zložiek odolnosti v % pre C4 a „V“ v čase 20 rokov

Z tab. 6.1 pre rovnomernú koróziu po celom obvode – typ „R“ poukazuje na prierezy, ktoré sú variantu A alebo majú veľmi štíhlu stenu, tieto sú čiastkovými zložkami odolnosti oslabované najviac. Úbytok vybraných zložiek odolnosti dosahuje maximum 11%. Ostatné prierezy sa pohybujú v úbytkoch do 7%.

Z tab. 6.2 pre koróziu podľa typu „S“ predikuje rovnaké závery ako typ „R“, len z pohľadu úbytku v extrémoch pod 15% a v ostatných prípadoch pod 11%. Z tab. 6.3 pre koróziu podľa typu „V“ dáva rovnaké závery ako pre predošlé dva typy „R“ a „S“ s extrémami pod 20% pre Mz_{rd} a v ostaných prípadoch do 14%.

7 ZÁVER

Oceľové mosty tvoria významnú súčasť železničnej infraštruktúry a sú jej neoddeliteľnou súčasťou. V minulosti boli jedinou konštrukciou používanou na železnici, ktorá prekonávala veľké rozpätia, či už sa jednalo o vodné toky a ich inundácie, alebo prírodné údolia v hornatejších častiach Slovenska. Väčšina starých oceľových mostov s prvkovou mostovkou sú nitované. Mladšie mosty sa robili so skrutkovanými spojmi s vysokopevnostnými skrutkami. V dnešnej dobe sú zvarané. Staré mosty sedemdesiat a viac ročné sa pomaličky blížia ku koncu svojej životnosti a pri vyšších nárokoch na prepravované hmotnosti bývajú obmedzujúcim prvkom z pohľadu zaťažiteľnosti (prechodnosti), častokrát aj priestorovej prechodnosti alebo po konštrukčnej stránke, ale aj z pohľadu prevádzkovej rýchlosti ak sa jedná o trate, kde bola zvyšovaná traťová rýchlosť. Typickou konštrukciou používanou na železnici boli mosty s prvkovou mostovkou, s priečnikmi a pozdĺžnikmi, na ktorých sú plošne a u moderných mostov centricky uložené drevené mostnice. Priamo namáhaný a často kritický nosný prvok je pozdĺžnik. Preto aj drobné oslabenie tohto prvku má za následok najväčšie zníženie odolnosti celého nosného systému. Oceľové mosty z hľadiska údržby sú oveľa náročnejšie ako železobetónové konštrukcie. U oceľových mostov s prvkovou mostovkou sa jedná o výmenu mostníc v intervale 15-20 rokov a obnovy protikoróznej ochrany najčastejšie zhotovovanej pomocou náterov. V prípade že degradácia protikoróznej ochrany zlyhá, (technologicky, materiálovo) no najmä degradáciou v čase, nastupuje nevratný dej oslabovania konštrukčného materiálu ocele koróziou.

Táto dizertačná práca bola zameraná na dopad korózie na nitované pozdĺžniky na existujúcich oceľových mostných konštrukciách. Motiváciou pre výskum bola potreba rýchleho odhadu určenia odolnosti prierezu, ktorý je vystavený účinkom korozívnych vplyvov. Práca nehľadá príčiny vzniku ale skôr hľadá následky na existujúcich mostných objektoch. Skúma aký dopad má úbytok materiálu na odolnosť prierezu nitovaného pozdĺžnika.

V prvej fáze boli z podkladov o mostných konštrukciách vyselektované oceľové mosty s prvkovou mostovkou. Tie boli podrobené podrobnejšiemu skúmaniu a triedeniu. Záverom je, že na území západného a stredného Slovenska (mosty v správe bývalého MO Bratislava) je 97 oceľových mostov s prvkovou mostovkou s nitovanými pozdĺžnikmi z celkového počtu 177 oceľových mostov v danej lokalite. Pre tieto mosty boli preštudované revízne správy a ku každému mostu bol vypísaný stav nitovaných pozdĺžnikov z pohľadu korózie. To odzrkadľovalo v akom stave pozdĺžniky sú. Iba v 14 prípadoch bola zmienka o tom, že nejaký úbytok materiálu na pozdĺžniku je a v ktorom mieste sa nachádza. Z nich sa vybrali dva v okolí Žiliny, na ktorých sa uskutočnili merania. Most č. 03 v Porúbke a most č. 08 v Poluvsí. Merania hrúbok časti pozdĺžnika nedeštruktívnou metódou bez nutnosti poškodenia SPKO

a merania základných rozmerov boli štatisticky vyhodnotené a prierezy simulované metódou Monte Carlo. Na základe výsledkov je možné konštatovať, že prierezy mali vyššie zložky odolnosti ako výpočtom stanovené pre nominálne hodnoty od 0,3% do 8,3%. Tento jav je spôsobený pravdepodobne tým, že v minulosti bola výroba oceľových výrobkov menej presná (väčšie hrúbky) alebo hodnoty korózie v revízných správach sú odhadované konzervatívne.

Na základe podkladov sa stanovilo rozmiestnenie korózie po priereze a odhadol ich pomerný úbytok, pretože nebolo možné ho meraniami preukázať. Vytypovali sa 3 prierezy oslabenia. Tie sa použili pre porovnanie korózných modelov. Výsledkom je štúdia, ktorá poukazuje, ktorý model má vplyv na oslabenie vybraného prierezu v čase. Záverom štúdie je, že modely, ktoré sú spracované pre prímorské a morské oblasti majú ďaleko rozsiahlejšie následky, v istých prípadoch až 7 násobné, ako normový prístup pre najhoršiu kombináciu v našich podnebných pásmach. V niektorých vybraných prípadoch je možné tieto modely použiť aj v našich podmienkach, keď sa korozívne vplyvy približujú podmienkam v prímorských oblastiach, teda dlhé zimy a vysoká vlhkosť popr. mosty pod ktorými vedie komunikácia, ktorá sa v zimnom období posypáva soľou.

V ďalšej fáze sa práca venovala citlivostnej analýze dopadov rôzne rozmiestnenej korózie na rôznych častiach prierezu na odolnosť pozdĺžnika. Pre analýzu bolo vybraných 25 rôznych pozdĺžnikov s premennou výškou od 300-900 mm, aby sa obsiahlo celé spektrum prierezov. Z nich bolo 15 mostov meraných in-situ (základné rozmery prierezu) a 10 mostov vypísaných z dokumentácie z archívu. Každý prierez mostu bol oslabovaný v siedmich miestach a oslabenie bolo odstupňované od 0-4 mm v kroku 0,1 mm. Výsledky boli prehľadne uložené a spracované. Z nich sa vybrala hodnota pre úbytok 1 mm, pretože ten už prevyšoval počítaný úbytok podľa normy po 20 rokoch. Z výsledkov vyplýva - vplyv na osovú silu je väčší u vyšších prierezov, pretože oslabujú väčšiu plochu, úbytok zložky odolnosti osovej sily N_{Rd} je 4% a v ostatných miestach oslabenia do 2%. Pre ohybový moment kolmo na rovinu y, $M_{y,Rd}$ je rozhodujúce oslabenie dolnej pásnice a profilu dolného profilu L, či už zosponu alebo zvrchu, ktoré vytvára ešte väčšiu nesymetriu prierezu a posúva neutrálnu os smerom hore čo má za následok zníženie únosnosti zložky o 6% V ostatných prípadoch sa znižuje do 2,6%. Na tento jav sú najviac náchylné prierezy variantu A a B. Pre ohybový moment kolmo na rovinu z $M_{z,Rd}$ sú rozhodujúce oslabenia pásnic, či už horných alebo dolných, tak isto aj ramená profilov L, v rozmedzí 2% - 5,5%. Plocha uholníkov pri stene a samotná stena má iba pomerne malý vplyv, rádovo do 0,5%. Pri priečnej sile $V_{z,Rd}$ je opačný efekt, nakoľko je počítaná z plochy steny, ktorá má zásadný vplyv na odolnosť prierezu. Najväčší vplyv to má u tenších stojím hrúbky 8mm prierez č. 11 a 13, úbytok odolnosti do 11% a vysokých stojím 10 mm u prierezov č.23 a 25 do 9%, ostatné prípady okolo 8%

V poslednej fáze sa práca zamerala na stanovenie zložiek odolnosti v čase. Pre túto fázu výpočtov sa postupovalo podľa normového výpočtu do 20 rokov. Táto hodnota bola zvolená z ohľadom na pokročilý vek existujúcich oceľových mostov (zvyčajne 60 a viac rokov), u ktorých je zvyšková životnosť častokrát nižšia ako 20 rokov. Nakoľko mosty v správe ŽSR majú všetky SPKO, ktorá sa periodicky opravuje, je iba málo mostov, ktoré majú celý prierez vystavený korózii dlhšie ako 20 rokov. Pri plánovaní výmeny mostnej konštrukcie za inú je čas od zámeru po realizáciu tri roky a viac, no nikdy to nepresiahne 20 rokov. Prierezy boli rozdelené na tri varianty, podľa toho či boli bez pridaných pásnic a skladali sa iba zo steny a dolných a horných L profilov - variant „A“, alebo s pridanou hornou pásnicou – variant „B“, alebo pridanou hornou aj dolnou pásnicou – variant „C“. Podľa toho prebiehal výpočet v napísanom scripture. Výpočty boli spracované pre každý rok od 0 po 20 rokov a pre oslabenie

prierezu podľa typu „R“ – rovnomerne okolo celého prierezu, „V“ – zvýšená korózia vodorovných častí trojnásobne a zvislých častí dolného L profilu jeden a pol násobne a „S“ – vodorovné plochy zhora, spodný L profil a jednej pätiny steny dvojnásobne. Vplyv agresivity prostredia sa zvolil pre naše podnébné pásmo v troch úrovniach C2, C3 a C4. Čiastkové výsledky boli uložené v zošitoch odkiaľ boli ďalej spracovávané.

Vyhodnotenie sa riešilo pre maximálnu hranicu oslabenie prierezu - dvadsiaty rok, vplyv agresivity prostredia C2, C3, C4 a hodnoty exponenta časovej závislosti na predpoklad a odhad korózneho napadnutia $B2=0,575$.

Záverom je že prierezy variantu „A“ alebo prierezy, ktoré majú veľmi štíhlu stenu sú čiastkovými zložkami odolnosti oslabované najviac. Úbytok vybraných zložiek odolnosti dosahuje maximum 11%, pre ostatné prierezy sa pohybujú v úbytkoch do 7% u prierezu oslabenia typu „R“. Pre oslabenie prierezu typu „S“ sú rovnaké závery ako typ „R“ len z pohľadu úbytku v extrémoch pod 15% a v ostatných prípadoch pod 11%. Pre oslabenie typu „V“ podobne ako prvých dvoch typoch s extrémom pod 20% pre $M_{z,Rd}$ a v ostatných prípadoch do 14%. Toto sú extrémny, ktoré v reálnej praxi pravdepodobne nikdy nebudú dosiahnuté.

7.1 Závery pre vedný odbor

Podľa dostupnej štúdie [50] sa odhaduje, že spotreba ocele, ktorá nahrádza skorodované prvky sa pohybuje v 25 % jej výroby. Ak sa zohľadňujú iba priame náklady, finančné náklady korózie sa v súčasnosti odhadujú na tri až štyri percentá globálneho HDP. Výroba ocele celosvetovo má vplyv aj na emisie CO_2 kde sa odhaduje, že do konca roka 2030 bude predstavovať 4,1 – 9,2 % z celkového množstva, a to už po zohľadnení znižovania množstva skleníkových plynov v USA a v Európe. Je tak zrejmé, že témy venované korózii a jej dopadom sú aktuálne a môžu napomôcť nielen pochopeniu tohto procesu, ale aj hľadaniu ciest ako sa s týmto fenoménom vysporiadať pri hodnotení starnúcej infraštruktúry.

Práve v oblasti mostného staviteľstva predstavuje korózia najdôležitejší environmentálny vplyv, ktorý ma za následok postupnú degradáciu nosných častí a aj mnoho kolapsov mostov. Dizertačná práca je zameraná na dopad korózie na nitované pozdĺžniky na existujúcich oceľových mostných konštrukciách. Motiváciou pre výskum bola potreba rýchleho odhadu určenia odolnosti prierezu, ktorý je vystavený účinkom korozívnych vplyvov. Práca nehľadá príčiny vzniku, ale skôr hľadá následky na existujúcich mostných objektoch. V zmysle definovaných téz, skúma aký dopad má úbytok materiálu na odolnosť prierezu nitovaného pozdĺžnika. Závery je však možné zovšeobecniť aj pre iné typy prierezov.

Vytvorený výpočet vplyvu korózie na nitované typy pozdĺžnikov vie byť nápomocný pri zisťovaní dopadov na ich odolnosť. Spracovaná simulačná procedúra vie pre tri rôzne typy nitovaných prierezov a tri rôzne varianty rozmiestnenia korozných úbytkov po priereze vygenerovať dopad na normálovú, ohybovú aj šmykovú odolnosť prierezu v akomkoľvek čase. Závisí to od zvolenej korózne funkcie, ktorá môže byť prakticky akákoľvek. Predpokladom sú stochastické vstupy geometrických parametrov – hrúbok jednotlivých materiálov. Bolo by potrebné v týchto analýzach ďalej pokračovať a zakomponovať aj stochastické vstupy materiálových charakteristík. S podporou moderných diagnostických metód, najmä nedeštruktívnych, sú oba tieto parametre zisťiteľné in-situ.

Vzhľadom na priebehy poklesu odolnosti v čase sa dá nastoliť do budúca aj otázka hľadania jednotnej (unifikovanej) závislosti znižovania odolnosti s narastajúcim časom exploatácie bez

SPKO. Takýto, aj keď približný „vzorec“ by bol pre praktické využitie veľmi vhodným nástrojom pri predikovaní zaťažiteľnosti a životnosti starých mostov (resp. ich prvkov) v čase.

7.2 Závery pre inžiniersku prax

Pre ekonomické dôsledky je potrebné pracovať na tom, aby korózne deje boli čo najmenšie a hospodárne nakladať s konštrukciami, ktorým sa blíži koniec životnosti.

V infraštruktúre ŽSR sa jedná hlavne o oceľové mosty ale aj všetky prvky z ocele, ako sú koľajnice, upevňovacie prostriedky koľajníc. Štúdium by mohlo pokračovať pre iné typy nosníkov, uzavretých, kde často nie je možné skontrolovať povrchy vo vnútri (v dutine) a výpočtom overiť aký dopad to má na únosnosť prvkov. Tiež by sa mohla štúdia zaoberať dopadom korózie v uzatvorených prierezoch. Mohol by sa vytvoriť a overiť model, ktorý by najviac odpovedal tomuto správaniu sa korózie za špecifických podmienok.

Práca priniesla reálnejší pohľad na koróziu pozdĺžnikov na tratiach ŽSR – Bratislavská časť. Priamym meraním sa zistilo, že nie vždy zdanlivá hrúbka korózie je v skutočnosti taká ako sa odhaduje. Porovnaním rôznych korózných modelov sa vypočítalo, aký vplyv majú na odolnosť prierezu. Pre rôzne nitované prierezy pozdĺžnika bolo zistené aký vplyv má, ktorá plocha na čiastkové odolnosti prierezu. Normový prístup použitý na 25 druhov prierezov, pre rôzne typy oslabený predikuje ako sa znížia zložky odolnosti v čase.

Pri prepočtoch, v hraničných prípadoch zaťažiteľnosti, pristúpiť k meraniam hrúbok a základných rozmerov a presnejšiemu štatistickému vyhodnoteniu a na základe nich spočítaniu prierezových charakteristík namiesto stanovenia prierezových charakteristík z nominálnych hrúbok, ktoré sú dostupné z projektu. Tak isto stojí za zváženie aj presnejšie určiť pevnostné charakteristiky materiálov rôznych prvkov.

Podľa uvedených výsledkov je možné odhadnúť mieru oslabenia odolnosti koróziou v čase. V takomto prípade je nutné zohľadniť, do ktorého variantu prierezu patrí, či má štíhlu stenu a zvoliť agresivitu prostredia v závislosti od danej lokality, v ktorej sa nachádza. Tieto poznatky by viedli k rýchlejšiemu rozhodovaniu napr. pri konštrukciách, ktoré sa blížia ku plánovanej životnosti. Zvážiť či konštrukcia dokáže prenášať ešte požadované zaťaženie z pohľadu únosnosti. Aj keď je to len čiastkový posudok, môže byť v prvom stupni rozhodujúci a nemusia sa ďalej vynakladať prostriedky na ich ďalšie posúdenia napríklad z pohľadu únavy. Taktiež by mohlo byť účinné pred koncom plánovanej životnosti určiť, či je potrebné vynakladať nemalé finančné prostriedky na obnovu SPKO alebo nechať konštrukciu „dožiť“ bez zásahu do nej.

VÝBER Z POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] NTSB Highway Accident Report (HAR-71-01), 1970.
- [2] Vizhi, I.M.; Kalirajan, K.; Selvaraj, S., „Study of Carbon Steel Corrosion in 1.0N HCL Medium by Mimosa Elengi Leaves Extract by Electro Chemical Studies,“ *Adv. Sci. Res.*, 2019.
- [3] Křivý, V.; Kreislová, K.; Rozlívka, L.; Knotková, D., „*Směrnice pro používání ocelí se zvýšenou odolností proti atmosférické korozi*“. SVÚOM Praha, 2010, ISBN 978-80-87444-05-4
- [4] Agkül, F.; Frangopol, M.D., Lifetime performance analysis of existing steel girder bridge superstructures, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, 2004.
- [5] Melchers, E.R., Corrosion Uncertainty Modelling for Steel Structures, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, 1999.
- [6] Soares, J.; Guedes, C.; Garbatov, Y., Reliability of maintained, corrosion protected plates subjected to non-linear corrosion and compressive loads, *Marine Structures*, 1999.
- [7] Qin, S.; Cui, W., Effect of corrosion models on the time-dependent reliability of steel plated elements, *Marine Structures*, Elsevier, 2003.
- [8] STN EN ISO 9223 Korózia kovov a zliatin. Korózna agresivita atmosféry. Klasifikácia, stanovenie a odhad (ISO 9223: 2012).
- [9] Streleckij, N., *Metody rascheta i proektirovaniya zdaniy i sooruzhenij*, Moskov, 1947.
- [10] ŽSR, VTP ŽSR Určovanie zaťažiteľnosti železničných mostných objektov, Bratislava.
- [11] Gubo, Š., „*South Bohemia Mathematical Letters* 23,“ pp. 18-27, 2015.
- [12] Křivý, V.; Kubzová, M.; Konečný P.; Kreislova K., „Corrosion Processes on Weathering Steel Bridges Influenced by Deposition of De-Icing Salts,“ *Materials*, %1. vyd.10.3390/ma12071089, 2019.
- [13] Iannuzzi, M.; Frankel, G. S., „The carbon footprint of steel corrosion,“ *Materials Degradation* 6, %1. vyd.101, 2022.

PUBLIKOVANÉ ČLÁNKY

- [1] Hlinka, R.; Odrobiňák, J.; Prokop, J.; Vičan, J.; Kridla, O.; Vavák, B.: *Evaluation of Riveted Railway Bridge Using Experimental-Numerical Analyses*. IABSE Symposium Prague, 2022, IABSE 2022, pp. 1115 – 1122.
- [2] Odrobiňák, J.; Farbák, M.; Prokop, J.; Vičan, J.; Vavák, B.: *Analysis of the Impact of the Ribbon Track on Unconventional Fixing on a Steel Multi-Span Bridge*. Ce/papers 2023, vol. 6, no. 5 (EUROSTRUCT 2023), pp. 1198-1207.
- [3] Figuli, L.; Papán, D.; Vavák, B.; Dvořák, Z.; Ottaviano, E.; Daponte, P.: *Monitorovanie stavu konštrukcie vybraných mostov počas ich životnosti*. 46. Aktiv pracovníkov odboru oceľových konštrukcií (zborník prednášok). EDIS UNIZA, pp. 63-73.
- [4] Koteš, P.; Vavruš, M.; Bahleda, F.; Kridla, O.; Vavák B.; Zitrický A.: *Mostné objekty na ozubnicovej železnici Časť 1 : Prehliadka a diagnostika*. Betón na Slovensku 2018 – 2022, zborník prednášok, Slovenský národný komitét fib, Bratislava 2022, pp. 230-235.
- [5] Koteš, P.; Vavruš, M.; Bahleda, F.; Kridla, O.; Vavák B.; Zitrický, A.; Rey M.: *Mostné objekty na ozubnicovej železnici: Časť 2 : Prepočet a návrh rekonštrukcie*. Betón na Slovensku 2018 – 2022, zborník prednášok, Slovenský národný komitét fib, Bratislava 2022, pp. 314-319.
- [6] Kotula, P.; Kridla, O.; Vavák B.: *Monitoring a diagnostika železničného mosta v km 82,589 Trate Margecany - Červená skala*. Betonárske dni 2022, zborník príspevkov, Spektrum STU, Bratislava, 2022, pp. 335-340.
- [7] Kotula, P.; Kridla, O.; Vavák B.: *Diagnostic and analysis of selected masonry railway bridges on Slovak Railways*. Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava, Civil Engineering, Roč. 22, č. 2 (2022), pp. 12-15.
- [8] Vavák, B.; Kotula, P.; Kridla, O.: *Prehľad súčasného stavu predpätých železničných mostov v sieti ŽSR*. Železniční mosty a tunely 2025, Sborník příspěvků 29. ročník konference - SUDOP Praha (2025), pp. 120-129.
- [9] Odrobiňák, J., Vičan, J., Hlinka, R., Prokop, J., Vavák, B.: *On the Load-Carrying Capacity Determination of Railway Box-Girder Bridges Using the Reduced Stress Method*. Civil and Environmental Engineering, Scienco 2026. (prijatý 2025, v tlači)

