



SLOVENSKÁ SPRÁVA CIEST

Schválil: generálny riaditeľ Slovenskej správy ciest

TP : 05/2002

Prognózovanie vplyvu porúch na zaťažiteľnosť mostov a stanovenie zostatkovej životnosti mostov

Metodická príručka

Slovenská správa ciest

Apríl 2002

OBSAH

1. Úvodná kapitola	3
1.1 Predmet metodologickej príručky.....	3
1.2 Nahradenie predchádzajúcich predpisov	3
1.3 Súvisiace technické predpisy (domáce a zahraničné).....	3
1.4 Súvisiace a citované normy	3
1.5 Vypracovanie predpisu.....	4
1.6 Distribúcia predpisu.....	4
1.7 Účinnosť predpisu	4
2. Všeobecne.....	4
3. Metódy tvorby prognostických modelov.....	5
3.1 Metóda súčiniteľov	5
3.2 Metóda funkcie životnosti.....	6
3.3 Metóda funkcie zaťažiteľnosti	8
3.4 Aplikácia princípu časových úsekov.....	10
3.5 Aplikácia Bayesovho princípu zlepšenia prognózy	11
4. Prognostický model zaťažiteľnosti	11
4.1 Počiatočná zaťažiteľnosť a funkcia zaťažiteľnosti	12
4.2 Statická schéma konštrukcie, zaťaženie a vplyv porúch.....	13
4.3 Stanovenie aktuálnej zaťažiteľnosti s ohľadom na vplyv porúch.....	13
4.4 Prognostický model únosnosti prierezu s ohľadom na vplyv porúch.....	14
4.4.1 Model vzniku korózie výstuže vplyvom karbonizácie.....	14
4.4.2 Model vzniku korózie vplyvom difúzie chloridov	15
4.4.3 Model korózie výstuže a stanovenie úbytku prierezovej plochy výstuže ..	16
4.4.4 Vznik trhlin pri korózii výstuže	16
4.4.5 Korózia predpínacej výstuže a stanovenie zníženia pevnosti.....	17
4.5 Stanovenie prognózovanej zaťažiteľnosti	17
5. Stanovenie zostatkovej životnosti na základe prognostického modelu.....	18
PRÍLOHA Príklad výpočtu zostatkovej životnosti.....	20

1. Úvodná kapitola

1.1 Predmet metodickéj príručky

Predmetom metodickéj príručky je postup pri odhade zostatkovej životnosti prevádzkovaných mostov. Odhad zostatkovej životnosti predstavuje činnosť vychádzajúcu z prepočtu zaťažiteľnosti naň nadväzujúcu. Podkladom pre aplikáciu uvedeného postupu sú výsledky komplexnej diagnostiky objektu. Metodická príručka je určená pre projektantov -statikov, diagnostikov mostov a správcov mostných objektov.

1.2 Nahradenie predchádzajúcich predpisov

Technický predpis s týmto spôsobom hodnotenia zostatkovej životnosti mostov nebol doposiaľ v SR spracovaný.

1.3 Súvisiace technické predpisy (domáce a zahraničné)

- [1] TRP1/1997 Prehliadky údržba a opravy diaľnic, ciest a mostov. Časť B Mosty, MDPT SR, 1997
- [2] Katalóg závad mostných objektov na diaľniciach a cestách I.,II. a III. triedy, SSC 1996
- [3] Metodické pokyny pre stanovenie zaťažiteľnosti betónových cestných mostov bez projektovej dokumentácie, VŠDS Žilina, 1990.
- [4] Pomôcka na určovanie zaťažiteľnosti starších mostov (metodická príručka), MVaŽP SSR 1988.

1.4 Súvisiace a citované normy

STN 73 1251	Navrhovanie konštrukcií z predpäťého betónu
STN 73 6203	Zaťaženie mostov
STN 73 6205	Navrhovanie oceľových mostných konštrukcií
STN 73 6206	Navrhovanie betónových a železobetónových mostných konštrukcií
STN P ENV 1991-1	Eurokód 1. Zásady navrhovania a zaťaženia konštrukcií. Časť 2-1: Zaťaženie konštrukcií – objemové hmotnosti, vlastná tiaž a úžitkové zaťaženie (73 0035)
STN P ENV 1991-3	Eurokód 1. Zásady navrhovania a zaťaženia konštrukcií. Časť 3: Zaťaženie mostov dopravou (73 6203)
STN P ENV 1992-1-1	Eurokód 1. Navrhovanie betónových konštrukcií. Časť 1-1:Všeobecné pravidlá a pravidlá pre pozemné stavby (73 1201)
STN P ENV 1992-1-3	Eurokód 2. Navrhovanie betónových konštrukcií. Časť 1-3:Všeobecné pravidlá. Betónové dielce a montované konštrukcie (73 1211)
STN P ENV 1992-1-4	Eurokód 2. Navrhovanie betónových konštrukcií. Časť 1-4: Všeobecné pravidlá. Betón z ľahkého kameniva (73 1203)
STN P ENV 1992-1-5	Eurokód 2. Navrhovanie betónových konštrukcií. Časť 1-5:Všeobecné pravidlá. Konštrukcie s nesúdržnou vonkajšou predpínacou výstužou (73 1201)

STN P ENV 1992-1-6 Eurokód 2. Navrhovanie betónových konštrukcií. Časť 1-6:Všeobecné pravidlá. Konštrukcie z prostého betónu (73 1201)

1.5 Vypracovanie predpisu

Ing. Ján Kucharík, CSc. , VÚIS Mosty s.r.o., Lamačská 8, 817 14 Bratislava, tel.02/6381 2031
e-mail: vuismost@gaston.sk

1.6 Distribúcia predpisu

Distribúciu TP zabezpečuje Slovenská správa ciest, Miletičova 19, 826 19 Bratislava, úsek 2000, tel. 50255 527, e-mail: marcela.binovska@ssc.sk

1.7 Účinnosť predpisu

TP nadobúda účinnosť schválením generálnym riaditeľom SSC uvedeným na titulnej strane.

2. Všeobecne

Stanovenie resp. výpočet odhadovanej zostatkovej životnosti predstavuje inžiniersky problém, ktorého podstatou je modelovanie chovania sa mostného objektu v čase v závislosti na jeho stavebno-technickom stave a pôsobení okolitého prostredia. Výsledkom je tzv. prognostický model, ktorý umožňuje kvalifikovaný odhad času, počas ktorého bude možné ešte objekt využívať pri splnení minimálnych prevádzkových požiadaviek.

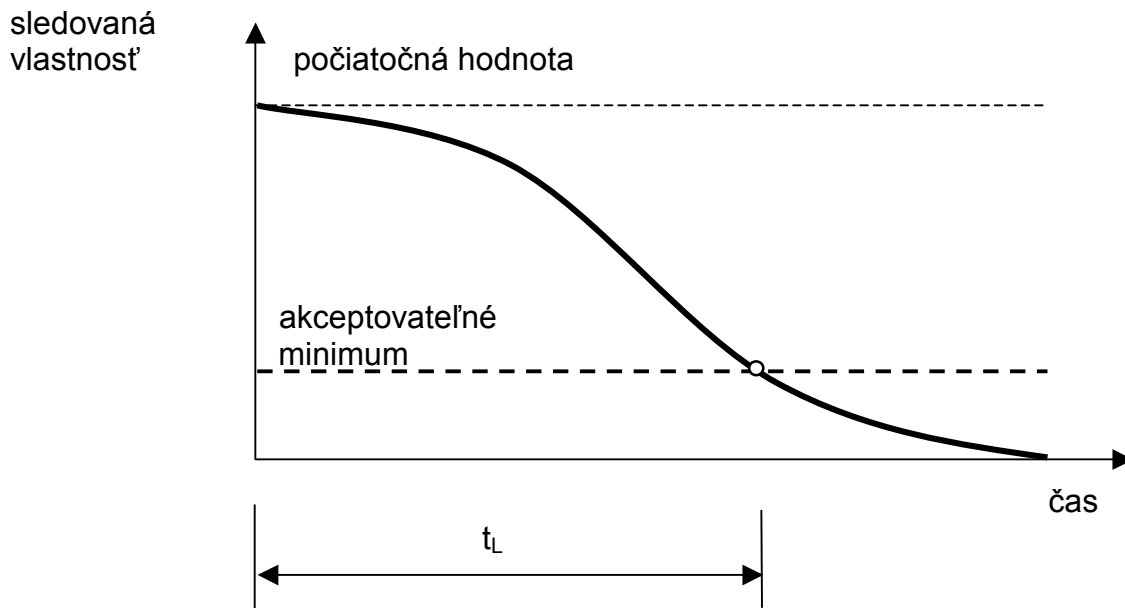
Na odhade zostatkovej životnosti je možné organizovať aktivity , súvisiace s hospodárením s objektom ako sú zvýšená starostlivosť o prevádzkovaný mostný objekt (kratší interval prehliadok, zvýšená údržba) a plánovanie opráv a rekonštrukcií s ohľadom na ekonomické náklady.

Základnými charakteristikami prognostického modelu sú :

- výber hodnotiacej vlastnosti,
- model priebehu hodnotiacej vlastnosti v čase,
- akceptovateľné minimum hodnotiacej vlastnosti.

Význam jednotlivých charakteristík prognostického modelu je zřejmý z obr.1
Stanovenie zostatkovej životnosti je možné v zásade vykonať tromi spôsobmi:

- a) aplikáciou simulačných modelov starnutia a degradácie konštrukcie;
- b) periodickým monitorovaním konštrukcie vrátane meraní dôležitých vlastností a vyhodnocovaním získaných výsledkov;
- c) kombinovanou metódou, založenou na použití simulačných modelov, modifikovaných na základe výsledkov pozorovaní a meraní.



OBR.1

Zostatková životnosť predstavuje časový interval ($t_1 - t_L$), za ktorý konštrukcia od sledovaného okamihu (t.j. vo veku t_1) dosiahne hraničnú hodnotu hodnotiacej vlastnosti.

Vo svojej podstate každý z uvedených postupov obsahuje časť matematicko-simulačnú a časť empirickú, predstavujúcu analýzu experimentálne získaných údajov.

3. Metódy tvorby prognostických modelov

Výstižnosť modelu prognózovania životnosti je v prvom rade ovplyvnená použitou metodikou. Výstižnejší model vyžaduje použitie presnejšej metódy, je náročnejší na vstupné údaje a pracnejší na spracovanie.

3.1 Metóda súčiniteľov

Metóda súčiniteľov (Factory method) sa formulovala v Japonsku ako jednoduchá deterministická metóda, ktorá sa zaradila do normy DIN ISO 15686-1. Odhad životnosti objektu sa určí zo vzťahu t_L :

$$t_L = k_A k_B k_C k_D k_E k_F k_G \cdot L_{ref} \quad (1)$$

Východiskovým údajom je tzv. referenčná doba životnosti L_{ref} . Je to časový úsek v ktorom predpokladáme, že konštrukcia bude slúžiť svojmu účelu v prípade štandardných podmienok.

L_{ref} môže byť stanovená na základe :

- dlhoročných skúseností s obdobným typom objektov a stavebných materiálov;
- na základe dohody príslušných orgánov (národných, európskych);
- podľa údajov v technickej literatúre.

Pre mostné objekty sa uvažuje štandardne referenčná životnosť na 80 rokov.

Modifikujúce súčinitele vyjadrujú:

- k_A vplyv kvality materiálov a konštrukčných dielcov,
 k_B úroveň projektu,
 k_C kvalitu zhotovenia ,
 k_D vplyv pôsobenia vnútorného prostredia,
 k_E vplyv pôsobenia vonkajšieho prostredia,
 k_F vplyv premávky a užívania objektu,
 k_G úroveň údržby.

V oprávnených prípadoch sa môžu súčinitele rozšíriť tak, aby odrážali skutočnú situáciu a špecifiká konštrukcie. Obecné platí, že neutrálna hodnota súčiniteľov je 1,0. Pre zhoršujúce vplyvy sa uvažuje hodnota 0,8 pre zlepšujúce vplyvy hodnota 1,2.

Súčiniteľ kvality materiálov sa môže uvažovať v závislosti od stavebného materiálu nasledovne:

kamenné klenbové mosty	2,0
železobetónové a betónové mosty	1,3
predpäté a oceľové mosty	1
drevené mosty	0,5

Metóda je použiteľná iba pre hrubý odhad a technické posúdenie pomocou koeficientov umožní predpísať intenzívnejšiu starostlivosť o objekt pri ich nižšej hodnote. Spresnenie metódy sa môže dosiahnuť presnejším stanovením L_{ref} a odvodením hodnôt modifikačných súčiniteľov zo štatistického vyhodnotenia príslušných javov.

3.2 Metóda funkcie životnosti

Funkcia životnosti vyjadruje, nakoľko mostný objekt spĺňa požadované kritéria funkčnosti a prevádzkyschopnosti. Pri jej stanovení sa vychádza z funkcie degradácie, ktorá vyjadruje zhoršovanie uvedených vlastností počas prevádzky objektu.

Na základe viacerých výskumných prác bola pre betónové konštrukcie odvodená funkcia degradácia v tvare:

$$D(t) = 1 - \exp(-C \cdot t^n) \quad (2)$$

kde pre n sa uvažujú hodnoty 2 až 2,5.

Z priebehu funkcie je zrejmé, že v čase $t=0$ má funkcia hodnotu 0 a vo veľmi vzdialenom čase hodnotu 1. Hodnota $D(t)$ v konkrétnom čase t_i vyjadruje tzv. stupeň degradácie δ , pre ktorého hodnoty platí tab.1

TAB.1 Hodnotenie degradácie

Hladina	δ	Hodnotenie konštrukcie
I	0,0-0,2	Konštrukcia je ako nová, prípadné poruchy nemajú vplyv na zaťažiteľnosť.
II	0,2-0,4	Výskyt porúch menšieho rozsahu, ktoré nemajú bezprostredný vplyv na aktuálnu zaťažiteľnosť, avšak znižujú odolnosť konštrukcie.
III	0,4-0,6	Výskyt vážnych porúch, ktoré ovplyvňujú zaťažiteľnosť, avšak konštrukcia spĺňa konštrukčné a funkčné požiadavky.
IV	0,6-0,8	Konštrukcia s vážnymi poškodeniami so zníženou zaťažiteľnosťou, obmedzujúcou funkčné využitie.
V	0,8-1	Konštrukcia s veľmi vážnymi poškodeniami v stave, ktorý sa blíži havarijnému, ohrozujúcemu bezpečnosť a prevádzkyschopnosť.

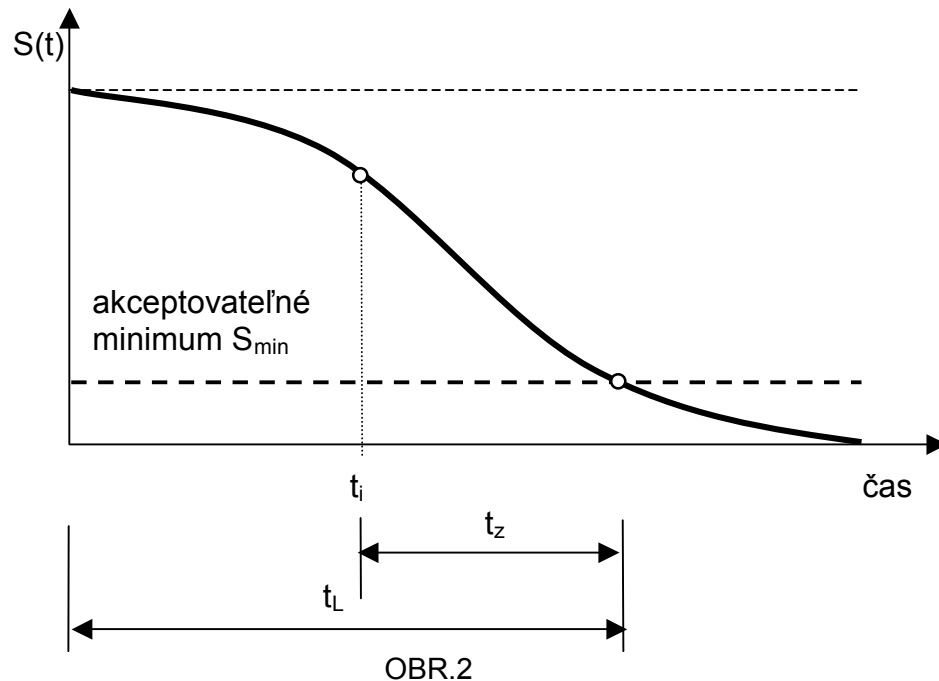
Tento prognostický model je aplikovaný v krajinách, kde je BMS založený na vykonávaní periodických prehliadok a klasifikácii stavu mostov na základe ich výsledkov.

Pri praktickej aplikácii sa v prípade konštrukcie posudzovanej v čase t_i na základe podrobnej prehliadky stanoví stupeň degradácie δ a z rovnice (2) sa vypočíta konštanta C . Životnosť konštrukcie sa stanovuje z funkcie životnosti $S(t)$, pre ktorú platí

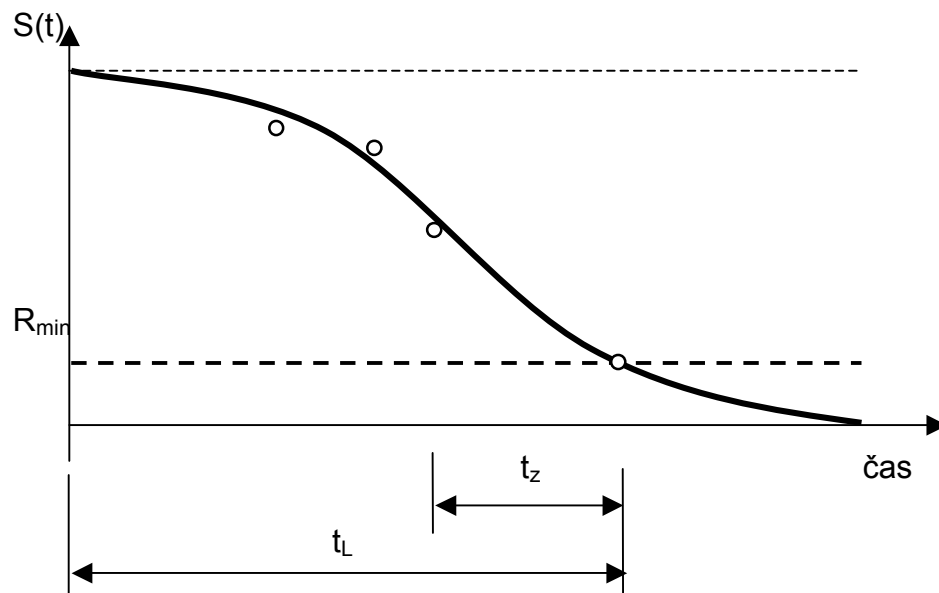
$$S(t) = 1 - D(t) = \exp(-Ct^n) \quad (3)$$

V čase $t=0$ má R hodnotu 1 a v čase vzdialenom sa t blíži k hodnote 0. Pre výpočet zostatkovej životnosti z rovnice (3) sa určí zostatková životnosť t_z ako interval od sledovaného okamihu po dosiahnutie akceptovateľného minima R_{\min} (obr.2)

$$t_z = t_L - t_i \quad (4)$$



Pri mostných objektoch sa za S_{\min} uvažuje hodnota $S = 0,2$. Koeficient $n = 2$ sa uvažuje pri poruchách s pomalším priebehom degradácie (spôsobených napr. karbonatizáciou a chloridovou koróziou betónu), $n = 2,5$ pri rýchlejšom priebehu rozvoja porúch (napr. súčasnom výskyte korózie a trhlin). V prípade, že máme k dispozícii viacero výsledkov pozorovaní s istým časovým odstupom môže sa stanoviť výstižnejší priebeh funkcie životnosti pomocou matematickej regresie.



OBR.3

3.3 Metóda funkcie zaťažiteľnosti

Väčšina modelov vyjadrujúcich spoľahlivosť a životnosť konštrukcií býva formulovaná ako porovnanie dvoch stochastických hodnôt :

- účinku zaťaženia a prostredia E ,
- odolnosti konštrukcie R .

Porovnaním týchto dvoch hodnôt sa získavajú poznatky o bezpečnosti a prevádzkyschopnosti (t.j. spoľahlivosti) konštrukcie s ohľadom na čas.

Porovnávané hodnoty E a R sú vo väčšine prípadov závislé na rade veličín či javov, ktoré sa nedajú vždy všetky zahrnúť do výpočtu. Spravidla pracujeme s obmedzeným počtom veličín, ktoré nazývame základné veličiny X_1, X_2, \dots, X_n , niektoré z nich sú funkčné pri účinku E , iné pri účinku R , niektoré pri oboch.

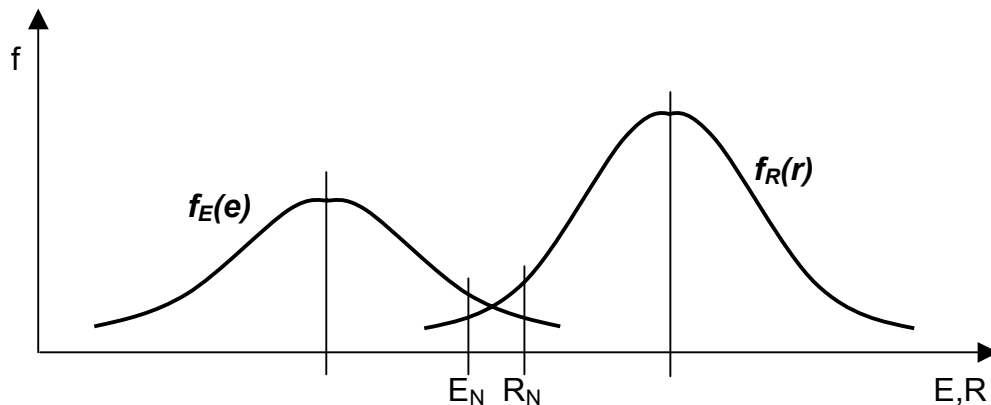
Pri stanovení a formulovaní charakteru základných veličín sa dá vychádzať z viacerých prístupov, ktoré zároveň určujú základný charakter analýzy životnosti.

- a) Základné veličiny považujeme za deterministické t.j. vyjadrené konkrétnou číselnou hodnotou. Tento prístup je akceptovaný v STN a aj v STN EN. Neistoty sa zohľadňujú pomocou tzv. parciálnych súčiniteľov spoľahlivosti.
- b) Základné veličiny sú definované ako náhodilé veličiny. Neistoty takejto veličiny sú vyjadrené modelom rozdelenia pravdepodobnosti (distribučnou funkciou alebo hustotou pravdepodobnosti).

Na základe výberu z uvedených dvoch prístupov hovoríme o uplatňovaní deterministického alebo pravdepodobnostného princípu pri analýze životnosti a spoľahlivosti.

Prípád uvažujúci iba s dvomi náhodnými veličinami – odolnosťou konštrukcie R a účinkom E je na obr. 4. Premennivosť veličín je charakterizovaná funkciami hustoty pravdepodobnosti $f_R(r)$ a $f_E(e)$. Na obrázku sú znázornené deterministické (nominálne) hodnoty týchto veličín R_N a E_N . Uvedené veličiny sa používajú v súčasnosti v aplikovaných metódach, pričom tu vystupuje základná požiadavka, aby R_N bola väčšia ako E_N s určitou špecifikovanou rezervou

spoľahlivosti t.j. neuvažuje sa priamo so strednými hodnotami odporu a účinku .



OBR.4

Deterministicky formulovaná podmienka spoľahlivosti má tvar

$$R_N \geq E_N \quad (5)$$

Pravdepodobnostný prístup vyžaduje tvar

$$R - E \geq 0 \quad (6)$$

Kde R a E sú náhodilé veličiny s hustotami pravdepodobnosti $f_E(e)$ a $f_R(r)$

Pri výpočte zaťažiteľnosti vychádzajúcom z deterministického prístupu sa posudzuje zaťažiteľnosť jednotlivých konštrukčných prvkov, pričom za zaťažiteľnosť objektu sa považuje vypočítaná najnižšia hodnota zaťažiteľnosti najslabšieho prvku . V podstate ide o posudzovanie únosnosti (odporu prierezov) R na účinky zaťaženia E . Za zaťažiteľnosť sa považuje veľkosť náhodilého zaťaženia predstavujúca účinky dopravy, ktorú je schopný posudzovaný prierez preniesť tak, aby bola splnená podmienka $R \geq E$.

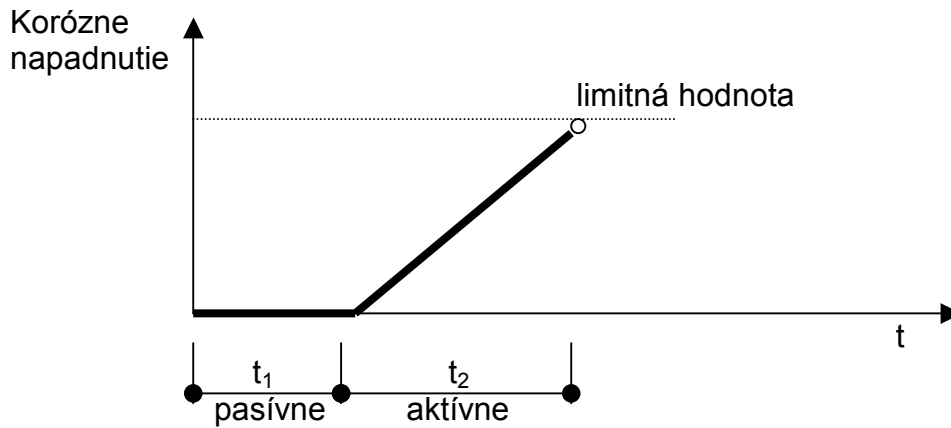
Ak za východiskový stav považujeme počiatočnú zaťažiteľnosť R_0 , aktuálna zaťažiteľnosť R_a vyjadruje vplyv odchýlok od projektovaného stavu, či sa už vyvolali zmenami a odchýlkami počas výstavby, poruchami, zmenami zaťaženia, stavebnými zásahmi a pod. Zaťažiteľnosť sa v priebehu času mení vplyvom degradácie objektu a dá sa vyjadriť funkčnou závislosťou

$$R(t) = R_0 - D(t) \quad (7)$$

Nejedná sa pritom o spojitú funkciu, nakoľko v prípade opravy alebo rekonštrukcie môže dôjsť k skokovitej zmene. Výsledkom opravy alebo rekonštrukcie mosta s nevyhovujúcou zaťažiteľnosťou je jej zvýšenie, ktoré je potrebné dokumentovať novým prepočtom. Takýto výpočet má svoje osobitosti, vyplývajúce z požiadavky modelovať väzby starej a novej časti konštrukcie a zohľadniť rozdielne fyzikálne - mechanické a reologické vlastnosti materiálov. Z uvedeného vyplýva, že získanie objektívneho výsledku výpočtu aktuálnej zaťažiteľnosti vyžaduje použiť náročnejšie postupy ako pri stanovení projektovanej zaťažiteľnosti. Významne ho ovplyvňuje komplexnosť a objektívnosť vstupných parametrov. Ich získanie je predmetom diagnostických prieskumov meraní a dlhodobých pozorovaní.

3.4 Aplikácia princípu časových úsekov

Existujú typy porúch, ktoré sú vyvolané vonkajšími vplyvmi. Konštrukcia spočiatku týmto vplyvom odoláva a porucha nenastane. Po určitom čase sa však vznik poruchy iniciuje a porucha sa rozvíja a ovplyvňuje funkciu konštrukcie. Typickým príkladom je korózia výstuže spôsobená karbonizáciou betónu. Kým je v okolí výstuže dostatočne alkalické prostredie, výstuž nekoroduje. Hovoríme o tzv. pasívnom štádiu t_1 , pri ktorom prostredie v okolí výstuže prestane byť alkalické a začína korozívny proces, ktorý sa prejavuje úbytkom plochy výstuže. Hovoríme o tzv. aktívnom štádiu t_2 , ktoré trvá do okamihu, kým plocha výstuže nedosiahne hodnotu, pri ktorej únosnosť konštrukcie prestane vyhovovať požiadavkám a táto sa stáva nefunkčnou. Zjednodušená schéma takéhoto procesu je na obr.5.

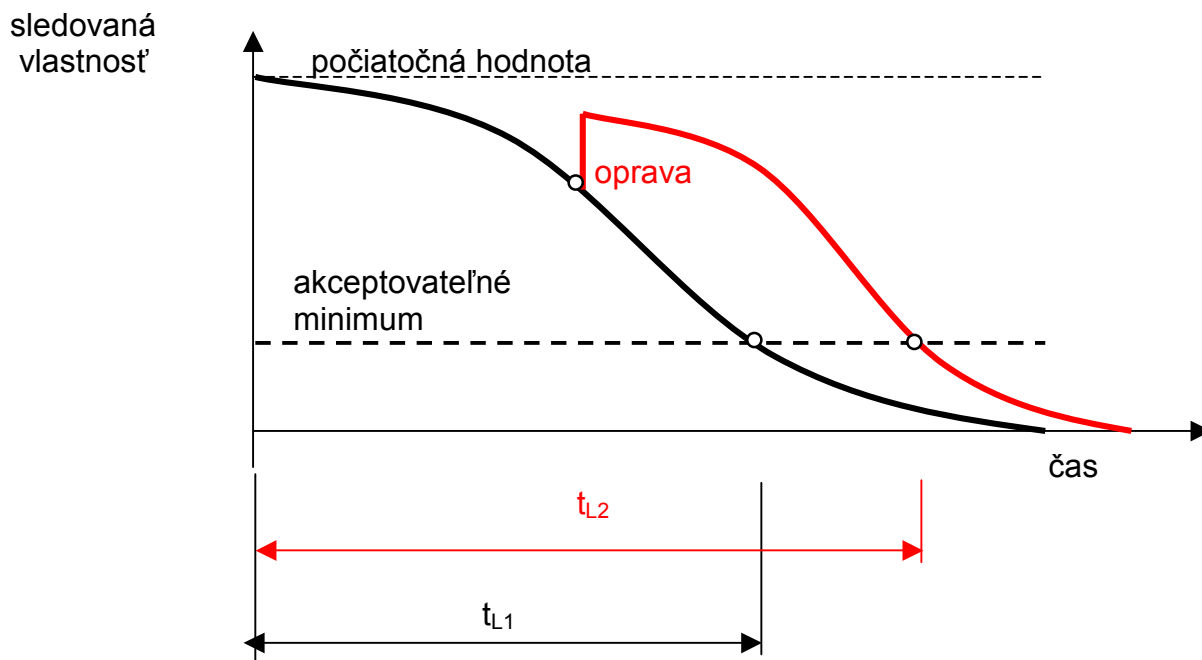


OBR.5

Pri modelovaní vývoja vybranej vlastnosti konštrukcie (napr. únosnosti) je nutné rozdeliť jej prevádzkový čas na viacero úsekov s rôznym funkčným vyjadrením zmeny sledovanej vlastnosti.

Dôležité je to najmä vtedy, ak sa na konštrukcii vykonala oprava, v rámci ktorej sa sledovaná vlastnosť zmenila. Opravou sa síce môže zvýšiť únosnosť konštrukcie, ale nekvalitným zhotovením ochrany sa môže proces degradácie urýchliť (obr.6).

Pri presnejších postupoch stanovenia životnosti je aplikácia princípu časových úsekov nevyhnutná.



OBR.6

3.5 Aplikácia Bayesovho princípu zlepšenia prognózy

Výstižnosť matematického simulačného modelu je založená na poznatkoch, ktoré sú získané z technického úsudku, odbornej literatúry, alebo meraniach na konštrukciách obdobného typu. Pre konkrétny prípad zobecňujúci simulačný model nemôže zohľadňovať všetky faktory, ktoré výstižnosť modelu ovplyvňujú a to najmä faktory lokálneho charakteru. Meraním sledovaného javu skúmanej konštrukcii sa môže stanoviť tzv. korekčný faktor. Typickým príkladom je napr. karbonizácia betónu, pri ktorej sa môže obecný vzťah spresniť na základe výsledkov skutočných meraní hrúbky skarbonizovanej vrstvy. Tento postup, nazývaný tiež Bayesov princíp predstavuje kombináciu matematického simulačného modelu a meraní in situ. Získané hodnoty korekčných faktorov sa uplatňujú v jednotlivých vzťahoch, čím sa významne spresňuje výsledok prognózy.

4. Prognostický model zaťažiteľnosti

Základom prognostického modelu zaťažiteľnosti je analytické vyjadrenie vzťahu $R - E$ v čase. V systéme R (odpor), E (účinok) vystupujú na jednej strane zaťaženia pôsobiace na určitých statických schémach a na druhej strane únosnosť prierezov daná geometrickými a materiálovými vlastnosťami. Sú to premenné veličiny v čase, ktoré je nutné v analytických modeloch vyjadriť ako funkcie času.

Na zmenu geometrických a materiálových vlastnosti vplyvajú procesy, ktoré sú považované za poruchy a líšia sa svojim časovým priebehom (tvorom základnej funkcie degradácie) ako aj rýchlosťou.

Pri stanovení zostatkovej životnosti sa vychádza z princípu, že interval životnosti končí, ak prestane platiť podmienka $R \geq E$, ktorú môžeme rozpísať ako

$$R(t) \geq E_g + E_d + E_{p,min} \quad (8)$$

kde

- E_g účinok stáleho zaťaženia,
 E_d účinok náhodilého dlhodobého zaťaženia,
 $E_{p,min}$ akceptovateľný minimálny účinok pohyblivého zaťaženia.

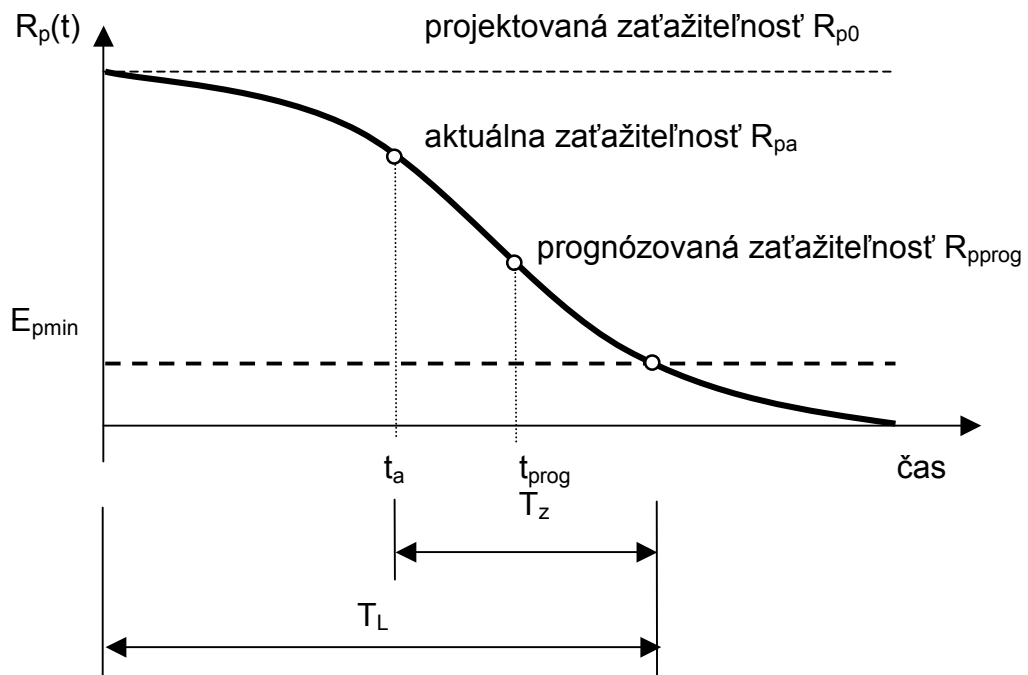
Zo vzťahu je zrejmé, že pri stanovení zostatkovej životnosti predpokladáme, že most bude v prevádzke i so zníženou zaťažiteľnosťou, až kým neklesne na minimálnu úroveň $E_{p,min}$, ktorá predstavuje určitý podiel z ako percentuálny podiel normou stanoveného účinku E_p . Upravený vzťah má tvar

$$R_p(t) \geq z \cdot E_p \quad (9)$$

4.1 Počiatočná zaťažiteľnosť a funkcia zaťažiteľnosti .

Odhad zostatkovej životnosti sa môže vykonať na základe známeho priebehu funkcie zaťažiteľnosti $R_p(t)$ (obr.7). K tomu je potrebné:

- na základe údajov projektu, resp. výsledkov diagnostiky stanoviť počiatočnú zaťažiteľnosť R_{p0} ,
- stanoviť aktuálnu R_{pa} zaťažiteľnosť na základe analýzy výsledkov diagnostiky,
- stanoviť prognózovanú zaťažiteľnosť R_{pprog} v čase $t_{prog} > t_a$ s ohľadom na predpokladaný vývoj porúch,
- zostrojiť funkciu zostatkovej životnosti matematickou regresiou zo známych hodnôt R_{p0} , R_{pa} a R_{pprog} a odhadnúť zostatkovú životnosť objektu pre definovanú E_{pmin}



OBR.7

Z uvedeného postupu je zrejmé, že najkomplikovanejšiu časť predstavuje výpočet prognózovanej zaťažiteľnosti, pri ktorom sa vychádza z prognostického modelu zaťažiteľnosti, zohľadňujúcim predpokladané zmeny statickej schémy zaťaženia a materiálových a prierezových charakteristík konštrukčných prvkov vplyvom rozvoja porúch.

4.2 Statická schéma konštrukcie, zaťaženie a vplyv porúch

Statickú schému objektu určuje spôsob uloženia nosnej konštrukcie, väzby medzi jednotlivými konštrukčnými prvkami a interakcia spodnej stavby s podložím. Pôvodná statická schéma objektu môže byť v priebehu prevádzky ovplyvnená rôznymi javmi a poruchami. V rozhodujúcej miere ju ovplyvňujú poruchy v uložení ako sú zablokovanie alebo vyčerpanie kapacity ložísk a kĺbov, bránenie voľných deformácií v dilatčných škárach. O správnej funkcii ložísk, kĺbov a mostných záverov sa nedá vždy presvedčiť iba podrobnou vizuálnou prehliadkou. V mnohých prípadoch sa dajú poruchy odhaliť iba monitorovaním deformácií pri výrazných teplotných rozdieloch.

Znemožnenie voľnej deformácie konštrukcie vyvoláva vznik prídavných namáhání, ktorých výskyt môže vyvolať pri určitej intenzite vznik charakteristických trhlín, ktoré evidentne potvrdzujú existenciu porúch uloženia a tým zmenu pôvodnej statickej schémy. Vyskytujú sa prípady, keď konštrukcia mení svoju statickú schému v závislosti na intenzite zaťaženia (dopravou, teplotou a pod.). Takýmto príkladom je napr. konštrukcia s kĺbmi uprostred rozpätia, pri ktorých dochádza pri určitom priehybe k zablokovaniu. Túto skutočnosť je potrebné zohľadniť pri prepočte zaťažiteľnosti. V rámci výkonu diagnostiky je potrebné zdokumentovať stav prvkov uloženia a zabezpečenie voľnej deformácie konštrukcie.

Samostatný problém predstavuje posúdenie funkčnosti vzájomných väzieb jednotlivých nosných prvkov. Typickým prípadom je priečne spojenie nosníkov. Ak majú priečne väzby poruchy, významne to ovplyvňuje priečny roznos a tým aj namáhanie jednotlivých prvkov.

Rozdiely v zaťažení nosnej konštrukcie môžu mať príčinu v geometrických odchýlkach tvaru konštrukčných prvkov a objemovej hmotnosti použitých materiálov. Častým prípadom je zvýšenie zaťaženia mosta novými vozovkovými vrstvami. Skutočnú hrúbku vozovky je potrebné v rámci diagnostiky jednoznačne stanoviť. Vplyv na zaťaženie má aj dodatočné zriadenie rôznych potrubných vedení na objekte .

Sadanie a pootáčanie podpôr vyvoláva prídavné zaťaženie, ktoré je potrebné identifikovať a stanoviť jeho účinok. Vhodné je vykonať geometrické zameranie a v prípade výskytu uvedeného javu zahájiť periodické sledovanie, ktorého cieľom je preukázať buď stabilizáciu alebo progresívny vývoj účinku.

4.3 Stanovenie aktuálnej zaťažiteľnosti s ohľadom na vplyv porúch

Pri stanovení aktuálnej zaťažiteľnosti mostného objektu vychádzame z únosnosti rozhodujúcich prierezov. Do vzťahov pre výpočet sa dosadzujú hodnoty geometrických a materiálových charakteristík, ktoré sa môžu odlišovať od projektovaných hodnôt a aj od aktuálnych hodnôt pri uvedení objektu do prevádzky.

Za hlavné charakteristiky sa považujú:

- a) rozmery prierezu,
- b) pevnosť betónu,
- c) plocha betonárskej a predpínacej výstuže,
- d) poloha betonárskej a predpínacej výstuže a hrúbka krycej vrstvy,
- e) súdržnosť predpínacej a betonárskej výstuže s betónom,
- f) pevnosť betonárskej a predpínacej výstuže,
- g) veľkosť predpätia.

Hodnoty uvedených charakteristík je potrebné stanoviť na základe výsledkov diagnostických meraní. Týka sa to predovšetkým charakteristík a) – d). Pevnosť betonárskej výstuže vystavenej účinkom povrchovej korózie (t.j. ak nedošlo k jej rozpadu) sa zjednodušene môže

uvažovať rovnakou hodnotou ako v prípade nekorodujúcich vložiek. Pevnosť predpínacej výstuže sa stanoví s ohľadom na výskyt a stupeň korózie. Ak nie je pevnosť stanovená experimentálne, môžu sa použiť údaje z odbornej literatúry.

Veľkosť predpätia sa môže stanoviť experimentálne. Ak sa to z rôznych dôvodov nedá, stanoví sa veľkosť predpätia výpočtom s ohľadom na reálny stav predpínacej výstuže a jej kotvenia.

4.4 Prognostický model únosnosti prierezu s ohľadom na vplyv porúch

Pri prognostickom modeli únosnosti prierezu sú uvedené hlavné charakteristiky prierezov premenné v čase a vyjadrujú sa ako hodnoty v čase t . Ich časová premennosť sa vyjadruje ako funkcia závislá na čase. Z hľadiska únosnosti a zaťažiteľnosti je rozhodujúca zmena plochy výstuže a jej spolupôsobenie s betónovým prierezom. Základné prípady korózie t.j. korózia vplyvom karbonizácie betónu a chloridová korózia sa vyšetrujú samostatne a vypočítané korozívne úbytky plochy výstuže sa sčítajú.

Ako je uvedené v kap. 3.4, vývoj korózie ocelevej výstuže má niekoľko štádií:

- a) pasívne štádium,
- b) aktívne štádium bez vzniku štiepných trhlín,
- c) aktívne štádium so vznikom štiepných trhlín a zníženou súdržnosťou výstuže s betónom.

Trvanie jednotlivých štádií je závislé od druhu (príčiny) korózie, charaktere prostredia a vlastností krycej vrstvy.

4.4.1 Model vzniku korózie výstuže vplyvom karbonizácie

Základnou rovnicou pre postihnutie procesov korózie zapríčinených pôsobením oxidu uhličitého je Fickova rovnica difúzie

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (4)$$

kde c je koncentrácia CO_2 na povrchu,
 t čas od začiatku pôsobenia na konštrukciu,
 x hrúbka skarbonizovanej vrstvy.

Najpoužívanejší model postupu karbonatácie vychádza zo vzťahu

$$x = A \cdot t^n \quad (5)$$

kde x je hĺbka kontaminácie,
 A konštanta.

Na základe analýzy meraní v časti 2 sa odporúča použiť hodnoty konštanty A z tab.2 pričom za n sa uvažuje hodnota 0,5.

TAB. 2 Hodnoty konštanty A

Prostredie	Koncentrácia CO ₂		
	nízka	stredná	vysoká
prirodzene vlhké	0,9	1,15	1,50
zatečený betón	1,1	1,55	2,30

Pre betóny C16/20 až C25/30 a sa hodnoty prenasobujú súčiniteľom $k = 1,3$.
Za iniciáciu korózie sa považuje stav, keď hrúbka skarbonizovanej vrstvy prekročí hrúbku krycej vrstvy výstuže. Iniciačný čas t_i , ktorý sa rovná dĺžke pasívneho štádia sa stanoví z rovnice (5).

4.4.2 Model vzniku korózie vplyvom difúzie chloridov

Na povrch betónu sa chloridové ióny dostávajú zatekaním vody z povrchu konštrukcie. Zachytávajú sa na povrchu a prenikajú dovnútra. Proces difúzie vyjadrený vzťahom prebieha tak, že koncentrácia chloridov klesá smerom do hĺbky. Naše pozorovania potvrdili, že mimo zimného obdobia prenikajúca voda, ale najmä bočný dážď vyplavujú chloridy z povrchu a z toho dôvodu môže byť rôzny priebeh koncentrácie chloridov po výške betónovej vrstvy.

Pre pomer medzi obsahom chloridov na povrchu v hĺbke x platí vzťah

$$C(x,t) = C(0,t) \left[1 - f\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \right] \quad (6)$$

kde $C(x,t)$ je koncentrácia chloridových iónov v hĺbke x a čase t ,

$C(0,t)$ koncentrácia chloridových iónov na povrchu,

D difúzny koeficient,

$f(z)$ funkcia vyjadrujúca vplyv hĺbky a zmenu difúzných vlastností v čase.

Problémom uvedeného vzťahu je, že predpokladá konštantný obsah chloridov na povrchu počas prevádzky. Pre difúzny koeficient sa používa vzťah

$$D = 0,06(906^{w/c}) \cdot 10^{-12} \quad (\text{m}^2/\text{s}^2) \quad (7)$$

Vzťah sa môže upraviť a zjednodušiť na tvar

$$C(x,t) = C(0,t) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{x}{B\sqrt{t}}\right) \right] \quad (8)$$

kde sa hodnota B stanovuje experimentálne.

Z experimentálnych meraní na prevádzkovaných mostoch sa odvodili odporúčané hodnoty:

pre betón C 30/37 a C35/45 $B = 3$
betón C 16/20, C 20/25 a 25/30 $B = 1,5$

Kritická koncentrácia v okolí výstuže, ktorá predstavuje iniciáciu korózie, je uvedená v niektorých zahraničných predpisoch rozdielnymi hodnotami. Vzhľadom na metódy používané u nás a s prihliadnutím na skúsenosti, odporúčame používať nasledovné kritické hodnoty koncentrácie chloridových iónov v % hmotnostných jednotiek:

0,04 % pre predpätý betón,

0,08% pre železový betón.

Doba fázy pasivácie sa zjednodušene môže vypočítať tak, že sa z diagnostických meraní stanoví ročný prírastok obsahu difundovaných chloridov a určí sa čas, kedy ich koncentrácia dosiahne limitnú hodnotu.

4.4.3 Model korózie výstuže a stanovenie úbytku prierezovej plochy výstuže

Ak na výstuži začne proces korózie, časť profilu vložky sa zmení na korozívny produkt. Obecne platí vzťah:

$$C(t) = A \cdot t^B \quad (9)$$

kde $C(t)$ je priemerná hrúbka skorodovanej oceľovej vrstvy,
 A, B sú konštanty závislé na druhu prostredia.

Na základe výsledkov prieskumov prevádzkovaných mostov sa odvodili hodnoty súčiniteľov A a B , ktoré sú v tab.3.

TAB.3 Hodnoty súčiniteľov A a B

Druh korózie	$A \cdot 10^{-3}$	B
Karbonizácia, prirodzene vlhký betón	40	0,6
Karbonizácia, zatečený betón	60	0,6
Zvýšený obsah chloridov, zatečený betón	53	0,8
Vysoký obsah chloridov, zatečený betón	58	1

Pre prípady karbonizácie a chloridovej difúzie sa môžu použiť aj vzťahy pre stanovenie korozívneho úbytku :

a) betón vystavený účinku karbonizácie:

$$q_1 = 21,84 - 1,35X_1 - 35,43X_2 + 234,76X_3 + 2,33 X_4 + 4,42X_5 + 250,55 X_6 \quad (11)$$

kde q_1 je korozívny úbytok vplyvom karbonizácie v 10^{-4} g/cm²/rok,

- X_1 teplota v °C,
- X_2 relatívna vlhkosť v %/100,
- X_3 koncentrácia oxidu v %/100,
- X_4 súčin $X_1 \cdot X_2$,
- X_5 súčin $X_1 \cdot X_3$,
- X_6 súčin $X_2 \cdot X_3$.

b) betón vystavený účinku chloridov:

$$q_2 = [-0,51 - 7,60 \cdot N + 44,97 \cdot (w/c)^2 + 67,95 \cdot N \cdot (w/c)^2] d/c^2 \quad (12)$$

kde q_2 je korozívny úbytok vplyvom pôsobenia chloridov v 10^{-4} g/cm²/rok,

- N koncentrácia soli vo vode v %,
- w/c vodný súčiniteľ v %/100,
- d priemer vložky výstuže,
- c hrúbka krycej vrstvy betónu.

4.4.4 Vznik trhlín pri korózii výstuže

Pri korózii výstuže táto zväčšuje svoj objem a spôsobuje vznik trhlín. Pre úbytok profilu

výstuže iniciujúci vznik trhliny y_0 platí vzťah:

$$y_0 = 74,5 + 7,3 c/\phi - 17,4 f_{c,sp} \quad (10)$$

kde c je hrúbka krycej vrstvy,
 ϕ priemer výstuže,
 $f_{c,sp}$ ťahová štiepna pevnosť betónu .

Pre šírku trhliny potom platí:

$$w = 0,05 + \beta(y-y_0) < 1,0 \text{ mm} \quad (11)$$

kde w je šírka trhliny v mm,
 β konštanta (jej hodnota je 0,0086 pre horný povrch a 0,0104 pre horný povrch),
 y hrúbka skorodovanej vrstvy ocele v μm .

4.4.5 Korózia predpínacej výstuže a stanovenie zníženia pevnosti

Na základe vykonaných experimentov sa zistilo, že predpínacia výstuž v dôsledku korozívnych procesov viditeľných na povrchu stráca svoju pevnosť. Na základe výsledkov týchto experimentov sa zostavila tab. 4

TAB.4 Hodnotenie stupňa karbonatizácie

Stupeň korózie		Úbytok ϕ (mm)	Pevnosť R_m (%)	Max. sila F_m	
				ϕ 4,5 (%)	ϕ 7 (%)
1	bez korózie	0	100	100	100
2	jemná povrchová	0	98	98	98
3	bodková	0	90	90	90
4	stredne silná	0,1	95	91	92
5	silná	0,3	85	74	78
6	šupinková	podľa skut.	70	ϕ skut x 0,7 R_m	

Pre hodnotenie stupňa korózie sa uvažuje nasledujúca zjednodušená klasifikácia:

1. *Výstuž bez korózie* - výstuž má pôvodnú oceľovosivú farbu.
2. *Jemná povrchová korózia* - korózia vytvára súvislý jemný povlak, ktorý sa dá trením o mäkkú látku (koža, textil) odstrániť, úbytok profilu je nemerateľný.
3. *Bodková korózia* - korózia vo forme bodiek vytvárajúcich jemné priehlbinky, oslabujúce prierez.
4. *Stredne silná povrchová korózia* - korózia vytvára povlak, ktorý oslabuje profil do 0,1 mm.
5. *Silná povrchová korózia* - viditeľné sú kryštáliky a zrnká korózie povrch výstuže je nerovný, oslabenie profilu je 0,2 - 0,3 mm.
6. *Šupinková korózia* - korozívne produkty sa odlupujú od jadra výstuže, oslabenie profilu je viac ako 0,4 mm.

4.5 Stanovenie prognózovanej zaťažiteľnosti

Za východisko pri stanovení prognózovanej (výhľadovej) slúži aktuálna zaťažiteľnosť, ktorá vo väčšine prípadov akceptuje starnutie konštrukcie a vplyv porúch. Rozhodujúcim faktorom je posúdenie aktuálnej situácie výstuže t.j.:

- a) stanovenie hĺbky skarbonizovaného betónu,
- b) stanovenie koncentrácie difundovaných iónov v oblasti výstuže,
- c) overenie výskytu korózie a stanovenie korozívneho úbytku.

Prvý krok pri stanovení prognózovanej zaťažiteľnosti v budúcnosti v čase t_{prog} predstavuje posúdenie, či sa skúmaný prierez z hľadiska korózie výstuže nachádza v stave pasívneho alebo aktívneho štádia. V prípade, že sa nachádza v aktívnom štádiu, stanoví sa čas iniciácie korozívneho procesu podľa druhu korózie, t.j. v oblasti, kde nezasahuje pôsobenie difundovaných chloridov z funkcie postupu karbonizácie. V prípade pôsobenia chloridov sa stanoví zo zistených, alebo vypočítanej koncentrácie chloridových iónov (v každom prípade je nutné stanoviť ich koncentrácie minimálne na povrchu) ročný prírastok koncentrácie a stanoví sa čas, keď koncentrácia prestúpi dovolenú limitnú hodnotu.

V druhom kroku sa stanoví úbytok výstuže v čase t_{prog} . Posúdi sa možný vznik trhlin a zníženie súdržnosti sa zohľadní redukčným koeficientom, ktorým sa prenášobí plocha príslušnej vložky. Z vypočítanej únosnosti prierezu (so zohľadnením reálnej statickej schémy, pevnosti betónu a vypočítanej prognózovanej plochy výstuže) sa určí rezerva únosnosti pripadajúca na pohyblivé zaťaženie – zaťažiteľnosť.

5. Stanovenie zostatkovej životnosti na základe prognostického modelu zaťažiteľnosti

Postup stanovenia zostatkovej životnosti pomocou funkcie zaťažiteľnosti je uvedený v kap.4.1. Prístup k stanoveniu zostatkovej životnosti ovplyvňuje skutočnosť, či sa v posudzovanom okamihu nachádza výstuž kritického prierezu v aktívnom alebo pasívnom štádiu z hľadiska korózie.

V prvom prípade sa funkcia zaťažiteľnosti rozdelí na dva časové úseky. V prvom $t_0 - t_i$ nenastávajú zmeny v kritickom priereze a v prípade zachovania statickej schémy konštrukcie a účinkov stáleho zaťaženia sa aktuálna zaťažiteľnosť rovná zaťažiteľnosti počiatkovej. Iniciačný čas t_i sa určí pomocou vzťahov, uvedených v kap. 4.

Postupom uvedeným v kap. 4.4 sa stanoví prognózovaná zaťažiteľnosť. Priebeh funkcie zaťažiteľnosti pre interval $t_i - t_{Lk}$ sa stanoví ako funkcia

$$R_p(t) = R_0 \cdot \exp(-C \cdot t^n) \quad (12)$$

Konštanta C sa určí z rovnice tak, že za $R_p(t)$ sa dosadí R_{pprog} . Hodnota konštanty n sa uvažuje z intervalu 2 – 2,5, podľa intenzity dopravného a environmentálneho zaťaženia.

Druhý prípad nastane, ak výstuž v kritickom priereze konštrukcie pri výpočte aktuálnej zaťažiteľnosti je v aktívnom štádiu. Vypočítaná aktuálna zaťažiteľnosť podľa kap.4 je nižšia ako počiatková R_{pa} . Vypočítaná prognózovaná zaťažiteľnosť zohľadňuje postupné znižovanie zaťažiteľnosti a predstavuje ďalší bod na grafe funkcie zaťažiteľnosti. Vlastná funkcia sa určí z hodnôt R_{p0}, R_{pa} a R_{pprog} zo základného vzťahu (12) aplikáciou metódy matematickej regresie.

Čas t_L sa určí ako okamih, keď hodnota $R_p = E_{pmin}$. Za hodnotu E_{pmin} uvažujeme 20% alebo 40% normou stanoveného pohyblivého zaťaženia a to buď normálneho alebo výhradného. Pre potreby hospodárenia s mostami určujeme 4 hodnoty zostatkovej životnosti $t_z = t_L - t_a$ (tab.5)

TAB.5 Hodnoty zostatkovej životnosti

zaťaženie	intenzita 20%	intenzita 40%
normálne	t_{zn02}	t_{zn04}
výhradné	t_{zr02}	t_{zr04}

Zostatkové životnosti sa stanovujú pre intenzitu zaťaženia 20 % a 40% ako

$$t_{z02} = \min(t_{zn02}, t_{zr02})$$

$$t_{z04} = \min(t_{zn04}, t_{zr04})$$

Môže sa aplikovať aj postup, pri ktorom sa nestanoví funkcia zaťažiteľnosti, ale určí sa únosnosť prierezu pre danú intenzitu zaťaženia t.j. $R_{pn02}, R_{pr02}, R_{pn04}, R_{pr04}$ minimálna potrebná plocha výstuže. Z funkcií vyjadrujúcich postup korozívneho procesu a veľkosti úbytku plochy výstuže $\Delta A = A_a - A_{min}$, kde A_{min} zodpovedá ploche výstuže, stanovenej pre konkrétnu minimálnu zaťažiteľnosť sa stanoví čas, za ktorý sa dosiahne vypočítaný úbytok plochy výstuže.

V nasledujúcej prílohe sa uvádza príklad výpočtu zostatkovej životnosti mostného objektu.

PRÍLOHA Príklad výpočtu zostatkovej životnosti

1) Charakteristika mostného objektu :

Rámová dosková trojpoľová železobetónová konštrukcia, postavená v roku 1953. V dôsledku zatekania a pôsobenia chloridov z posypových solí došlo ku korózii betónu v časti dosky pod rímsou a korózii výstuže. Pás šírky 200 mm je porušený trhlinami a rozpadom betónu, 2 prúty výstuže nespôsobia s prierezom, ostatné sú oslabené koróziou . Diagnostika a prepočet zaťažiteľnosti vykonané v r.2000.

2) Parametre kritického prierezu:

projektovaný stav r.1953:

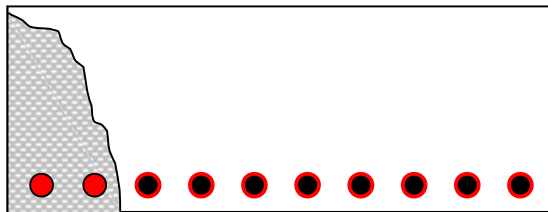
šírka 1000 mm

výška 530 mm

betón B 330

ocel': trieda A0

výstuž: 10 \varnothing 24



OBR. P1

aktuálny stav v r.2000:

šírka 800 m

výstuž: 8 \varnothing 20,9 (priemerná hodnota)

prognózovaný stav v r.2010:

predpokladáme zmenu prierezovej plochy výstuže

podľa vzťahu (9) a tab.3 vypočítame hrúbku skorodovanej vrstvy, úbytok profilu výstuže pre intenzívnu chloridovú koróziu:

$$C = A \cdot t^B = 0,058 \cdot 10 = 0,58 \quad \dots \text{ predpokladaný profil v r.2015 } \varnothing 19,7$$

zaťaženie a namáhanie:

ohybový moment od vlastnej tiaže a

ostatného stáleho zaťaženia $M_g + M_{g1} = 87$ kNm

ohybový moment od pohyblivého zaťaženia

normálneho $M_{nv} = 123,9$ kNm (vozidlá) $M_{ns} = 8,5$ kNm (spojité zať.)

výhradného $M_r = 162,7$ kNm

3) Zaťažiteľnosť prierezu:

a) počiatočná (r.1953):

únosnosť prierezu $M_{0max} = 255,1$ kNm

rezerva pre pohyblivé zaťaženia $M_{p0max} = 255,1 - 87,0 = 168,1$ kNm

zaťažiteľnosť normálna

$$V_{n0} = ((M_{p0max} - M_{ns}) / M_{nv}) \cdot 320 = ((168,1 - 8,5) / 123,9) \cdot 320 = 412 \text{ kN}$$

zaťažiteľnosť výhradná

$$V_{r0} = (M_{p0max} / M) \cdot 800 = (168,1 / 162,6) \cdot 800 = 828 \text{ kN}$$

b) zaťažiteľnosť aktuálna (r.2000):

únosnosť prierezu $M_{amax} = 161,4 \text{ kNm}$

rezerva pre pohyblivé zaťaženia $M_{pamax} = 161,4 - 87,0 = 74,4 \text{ kNm}$

zaťažiteľnosť normálna

$$V_{na} = ((M_{pamax} - M_{ns}) / M_{nv}) \cdot 320 = ((74,4 - 8,5) / 123,9) \cdot 320 = 170 \text{ kN}$$

zaťažiteľnosť výhradná

$$V_{ra} = (M_{pamax} / M_r) \cdot 800 = (74,4 / 162,6) \cdot 800 = 366 \text{ kN}$$

c) zaťažiteľnosť prognózovaná (r.2010):

únosnosť prierezu $M_{pprogrmax} = 150,8 \text{ kNm}$

rezerva pre pohyblivé zaťaženia $M_{pprogrmax} = 146,4 - 87,0 = 59,3 \text{ kNm}$

zaťažiteľnosť normálna

$$V_{n0} = ((M_{pprogrmax} - M_{ns}) / M_{nv}) \cdot 320 = ((59,3 - 8,5) / 123,9) \cdot 320 = 131 \text{ kN}$$

zaťažiteľnosť výhradná

$$V_{r0} = (M_{pprogrmax} / M_r) \cdot 800 = (59,3 / 162,6) \cdot 800 = 292 \text{ kN}$$

4) Výpočet zostatkovej životnosti

a) funkcia zaťažiteľnosti pre normálnu zaťažiteľnosť

vstupné parametre:

$$R_p(0) = 412 \text{ kN}$$

$$R_p(47) = 170 \text{ kN}$$

$$R_p(57) = 131,2 \text{ kN}$$

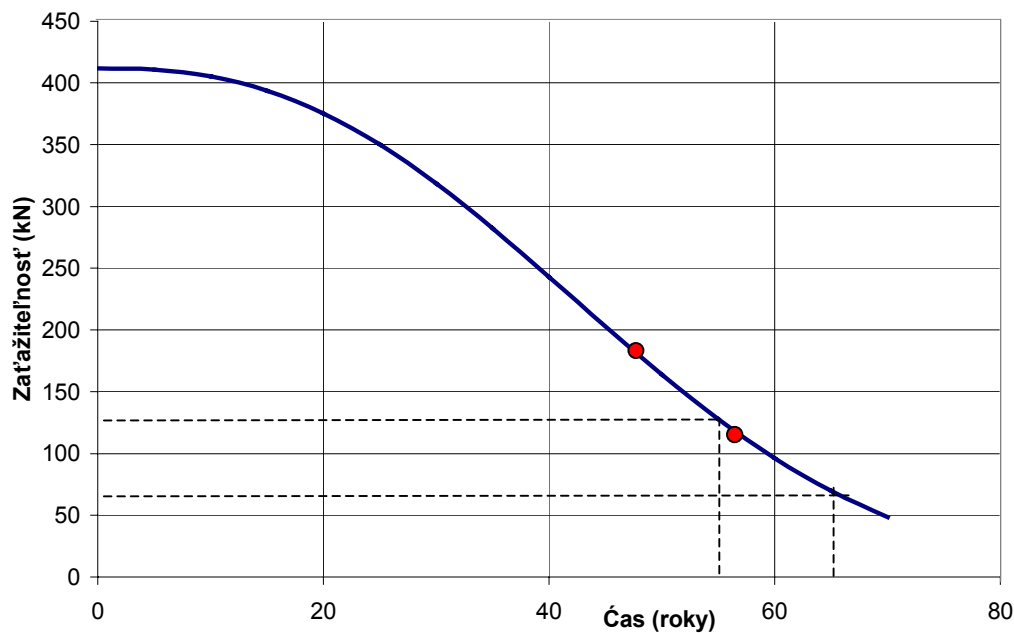
$$R_p(t) = R_{p0} \cdot \exp(-C \cdot t^n)$$

$$R_p(t) = 412 \cdot \exp(-5,22 \cdot 10^{-5} \cdot t^{2,5})$$

Graf funkcie je na obr.P2

pre 40% R_p $t_L = 54,9$ roky t.j. $t_{zn04} = 7,9$ r

pre 20% R_p $t_L = 66,2$ roky t.j. $t_{zn02} = 19,2$ r



OBR.P2

b) funkcia zaťažiteľnosti pre výhradnú zaťažiteľnosť

vstupné parametre:

$$R_p(0) = 828 \text{ kN}$$

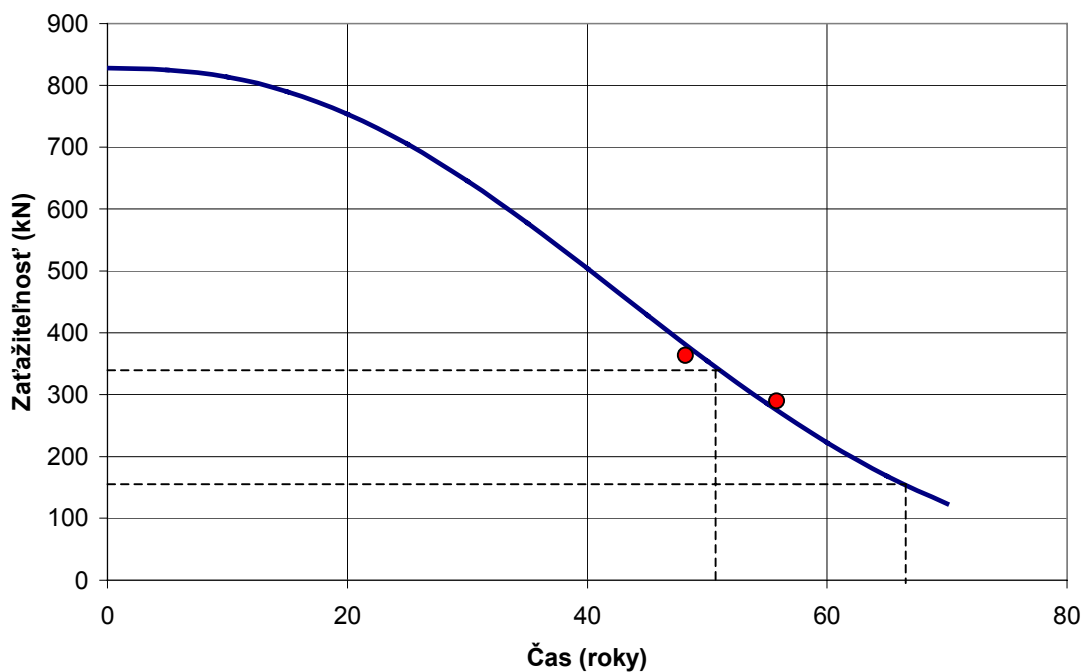
$$R_p(47) = 366 \text{ kN}$$

$$R_p(57) = 292 \text{ kN}$$

$$R_p(t) = R_{p0} \cdot \exp(-C \cdot t^n)$$

$$R_p(t) = 828 \cdot \exp(-7.1 \cdot 10^{-5} \cdot t^{2.4})$$

Graf funkcie je na obr.P3

pre 40% R_p $t_L = 52,4$ roky t.j. $t_{zn04} = 5,4$ rpre 20% R_p $t_L = 69,2$ roky t.j. $t_{zn02} = 22,2$ r

OBR.P3

Výsledné hodnoty zaťažiteľnosti :

$$t_{z04} = 5,4 \text{ roka}$$

$$t_{z02} = 19,2 \text{ roka}$$