

Stanovení životnosti betonových konstrukcí objektů pozemních komunikací

Technické podmínky

*Schváleno MD-OPK č.j.-419/06-120-RS/2 ze dne 27. 7. 2006
s účinností od 1. srpna 2006*

SVÚOM s.r.o.
2006

O b s a h

	Str.
1 OBEČNÁ USTANOVENÍ	3
1.1 Základní ustanovení	3
1.2 Pojmy a definice	4
1.3 Sběr dat, archivace a navazující předpisy	5
2 VLIV VNĚJŠÍHO PROSTŘEDÍ, NÁVRHU A KONSTRUKČNÍHO ŘEŠENÍ	5
2.1 Základní ustanovení	5
2.2 Vliv vnějšího prostředí	6
2.3 Vztah mezi zatížením a návrhem konstrukce	12
2.4 Interakce účinků zatížení konstrukce a prostředí	13
2.5 Vliv postupu výstavby	13
3 PROVOZNÍ PROHLÍDKY, PODMINKY HODNOCENÍ A ZBYTKOVÁ PROVOZNÍ ŽIVOTNOST	16
3.1 Úvod	16
3.2 Hodnocení stárnutí železobetonu nebo účinků degradace	16
3.3 Posouzení stavu konstrukce a životnosti	20
3.4 Prohlídky a údržba	21
3.5 Metody stanovení spolehlivosti založené na pravděpodobnostním principu	22
4 METODY STANOVENÍ ŽIVOTNOSTI BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ	25
4.1 Úvod	25
4.2 Stanovení životnosti nových konstrukcí	25
4.3 Stanovení zbytkové provozní životnosti	34
4.4 Stanovení zbytkové životnosti založené na extrapolacích	36
4.5 Souhrn	37
5 EKONOMICKÉ HODNOCENÍ	38
5.1 Úvod	38
5.2 Metody ekonomické analýzy	38
5.3 Problémy v souvislosti s ekonomickým hodnocením životnosti	40
6 VÝVOJOVÉ TRENDY	42
6.1 Úvod	42
6.2 Projektování trvanlivosti	43
7 ZÁVĚR	44
Literatura	44
Příloha A	
Příloha B	
Příloha C	

1 OBECNÁ USTANOVENÍ

1.1 Základní ustanovení

Tyto Technické podmínky (dále jen TP) poskytují návod k postupu při stanovení životnosti konstrukcí betonových mostů a dalších objektů pozemních komunikací (dále jen PK). Slouží ke stanovení optimální strategie údržby, oprav a rekonstrukcí stávajících konstrukcí z hlediska životnosti konstrukcí a jsou vodítkem při posuzování vhodnosti návrhu nových konstrukcí.

Tyto TP podávají informace o činitelích ovlivňujících životnost jak nové, tak stávající betonové konstrukce a uvádějí zásady pro sběr dat a možnosti vypracování vhodného modelu pro stanovení životnosti betonových konstrukcí objektů PK. V TP jsou uvedeny charakteristiky jednotlivých parametrů ovlivňujících životnost jak nových, tak stávajících železobetonových nebo předpjatých konstrukcí a způsoby jejich vyhodnocování.

Cílem těchto TP je též pomáhat zvyšování efektivnosti provozu betonových konstrukcí se zřetelem k dlouhodobým ekonomickým vlivům.

Metodiky pro určování životnosti jsou zpracovány jak pro aplikaci při návrhu konstrukce, kdy mohou v návaznosti a v souladu s platnými předpisy být zavedeny zaručené parametry jako výběr vhodného vodního součinitele, tloušťka krycí betonové vrstvy a druh přísad, tak zejména pro stávající konstrukce, kde strategie prohlídek a údržby je operativně určována, např. v návaznosti na stav a provozní náklady objektu. Uvedené metody jsou určeny pro stanovení životnosti betonové konstrukce, pomocí srovnávacích metod, použití zrychlených testů degradace, použití matematických modelů a simulací a aplikace spolehlivostních a stochastických metod. Z hlediska životnosti má projektová dokumentace obsahovat návrh statický i návrh konstrukční, návrh materiálů, plány údržby, záruky kvality a kontroly kvality budoucí konstrukce.

V návaznosti na návrh třídy betonu, včetně výběru jeho složek, ukládání, hutnění a ošetřování, znalosti o vlastnostech materiálů, druh očekávaného prostředí v místě objektu, konstrukční detaily (jako je např. krytí výztuže betonem), předpokládaný průběh zatěžování a definici konce životnosti, může být stanovena životnost a může být navržen beton požadovaných vlastností pro danou životnost [1,2] Akceptování moderních materiálů, jako např. vysokohodnotných betonů, závisí na analýzách nákladů po dobu životnosti konstrukce při uvažování jejich delší doby životnosti.

U metodik pro stanovení životnosti stávající konstrukce je nutné znát stávající stav konstrukce, stupeň degradace, dřívější a budoucí zatížení, napětí způsobená degradačními procesy a vlastním zatížením konstrukce a definici konce životnosti [3]. Na základě znalosti zbytkové životnosti objektu mohou být prováděna ekonomická rozhodnutí o tom, zda je vhodnější konstrukci opravit, rekonstruovat nebo vyměnit. První krok tohoto procesu musí být zaměřený na určení příčin degradace.

V TP jsou uvedeny i příklady užití uvedených metodik pro betonové konstrukce nebo prvky a rovněž jsou naznačeny směry dalšího vývoje pro zlepšení spolehlivosti předpovědi životnosti.

1.2 Pojmy a definice

1.2.1 Trvanlivost ^{*} je schopnost výrobku, dílu, nebo konstrukce udržovat provozuschopnost po požadovanou dobu.

Použitelnost je schopnost vykonávat funkci (funkce), pro které byly konstrukce navrženy a zhotoveny.

1.2.2 Životnost [†] (konstrukce, prvku nebo materiálu) je časový úsek po zabudování (u betonu po uložení do konstrukce), během kterého všechny části dosáhnou minimální akceptovatelnou hodnotu použitelnosti za předpokladu běžné údržby.

Technická životnost – je časový úsek používání do doby, kdy konstrukce dosáhne neakceptovatelného stavu, jako je snížení úrovně bezpečnosti pod přípustnou mezí, porušení konstrukčních prvků, odpadávání betonu, aj.

Funkční (provozní) životnost - je časový úsek používání do doby, kdy konstrukce přestává splňovat funkční požadavky, jako je větší průjezdný prostor, větší nápravové zatížení, apod.

Ekonomická životnost - je časový úsek používání do doby, kdy náhrada konstrukce (nebo její části) je výhodnější, než její další udržování v provozu.

1.2.3 Konec životnosti

Pro účely stanovení životnosti určité betonové konstrukce nebo jejího prvku musí být definován konec životnosti. Konec životnosti může být například definován jako stav, kdy:

- bezpečnost konstrukce je nepřijatelná vzhledem k degradaci materiálu, nebo překročení projektované únosnosti;
- degradace materiálu je výrazná, například koroze výztuže vyvolaná situací, kdy pronikající chloridové ionty dosáhly mezní hodnoty (kritické koncentrace iniciující korozi) v hloubce uložení výztuže;
- požadavky údržby přesahují přípustnou hranici;
- provozní parametry konstrukce jsou již nedostačující, např. nevyhovující prostorové uspořádání mostu;
- estetický vzhled je nepřijatelný.

Je třeba, aby všechna rozhodnutí ohledně konce životnosti byla činěna s ohledem na bezpečnost osob a na ekonomickou stránku. V některých případech může být akceptován stav konstrukce pod stanovenou mez, ale je třeba uvážit vyvolané náklady (ztráty) s tím spojené.

^{*} v angličtině „durability“

[†] v angličtině „service life“ („provozní“ životnost)

1.3 Sběr dat, archivace a navazující předpisy

Pro potřeby stanovení životnosti je třeba, aby u jednotlivých konstrukcí bylo určeno základní množství dat, které během provozní doby bude nutno sledovat, vyhodnocovat a archivovat. Nejdelší interval sběru dat odpovídá intervalům hlavních prohlídek, které jsou dány příslušnými předpisy.

Základní výchozí minimum údajů vztahujících se k stanovení životnosti:

- třída (značka, druh) použitého betonu, množství a druh cementu, hodnota vodního součinitele, použité množství a druh přísad
- druh použité výztuže a skutečné tloušťky krycí betonové vrstvy

Tyto údaje mají být sledovány samostatně pro jednotlivé části konstrukce. V případě mostního objektu jde o tyto části konstrukce:

- spodní stavba – dřív podpěry, křídla, úložné prahy, atd.
- nosná konstrukce – rozdělení po polích, nosnících, atd.
- svršek mostu – římsy, chodníky, betonová svodidla, atd.

Povinností správce mostu je archivovat údaje o použitých materiálech jako součást pasportu objektu

V rámci provádění hlavních a mimořádných prohlídek se podle pokynů v **Příloze A** těchto TP stanoví pro jednotlivé konstrukce, které jejich části a typy závad je nutno sledovat přednostně a v jakých intervalech.

2 VLIV VNĚJŠÍHO PROSTŘEDÍ, NÁVRHU A KONSTRUKČNÍHO ŘEŠENÍ

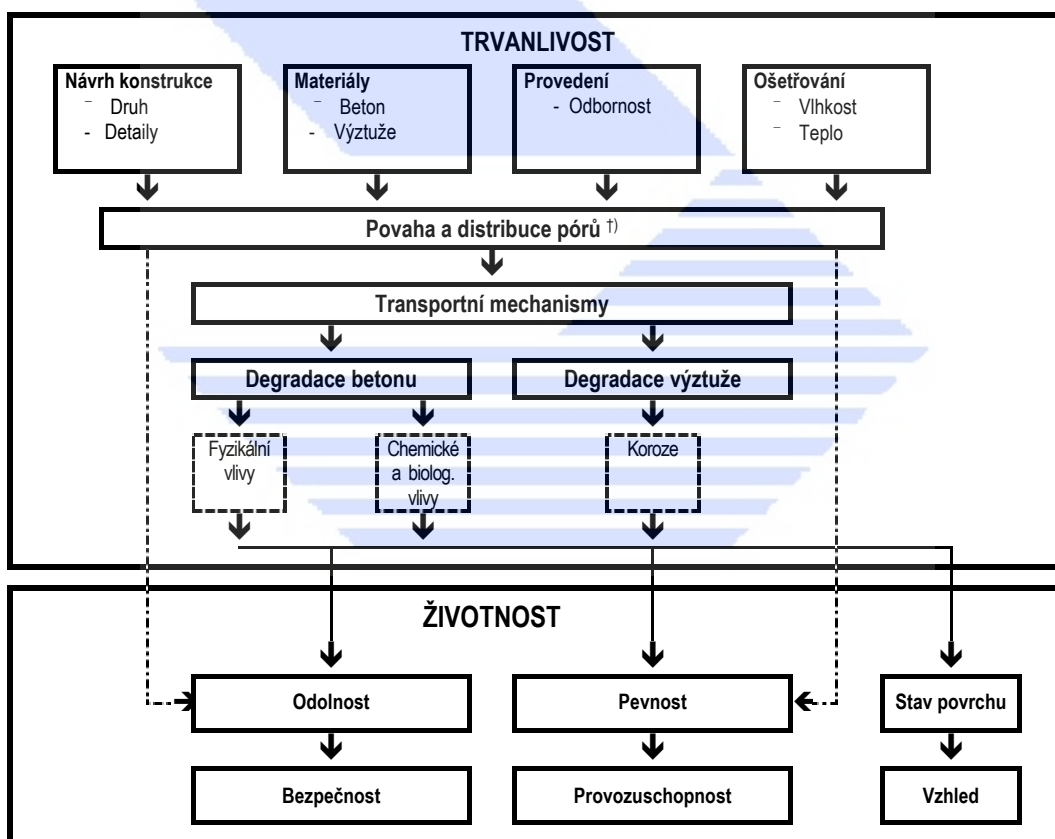
2.1 Základní ustanovení

Železobetonové konstrukce byly a jsou navrhovány v souladu s ČSN, EN a dalšími předpisy. Dnešní návrhové metody stále více reagují na přibývajících a upřesňujících se požadavky trvanlivosti (např. požadavek odolnosti proti pronikání chloridů a odolnost proti účinkům mrazu). V projektové dokumentaci provedené v souladu s těmito předpisy je zahrnuta určitá úroveň trvanlivosti, jako jsou například požadavky na tloušťku krycí betonové vrstvy a třídu betonu v daném prostředí. Ačkoliv převažující většina železobetonových konstrukcí splňuje dané požadavky, existují případy, kde není dosažena požadovaná trvanlivost nebo životnost. Výběr materiálu a návrh konstrukce musí být proveden s ohledem na dlouhodobou trvanlivost.

2.2 Vliv vnějšího prostředí

Návrh železobetonové konstrukce vypracovaný tak, aby byla zajištěna požadovaná trvanlivost, je komplikovaný proces. Životnost závisí na konstrukčním návrhu a návrhu detailů, výrobě betonu a jeho zpracování, postupech výstavby a údržbě. Důležité jsou změny ve způsobu užívání, zatížení a vlivu prostředí. Významný podíl na životnosti má vodotěsnost konstrukce a zcela zásadní význam má ochrana konstrukce proti zatékání vody (izolační souvrství, vodotěsnost mostních závěrů a pod.)

Proces chemické a fyzikální degradace betonu v čase je především závislý na přítomnosti a transportu škodlivých látek v betonu,^{*)} na četnosti a opakování působícího zatížení. Obr. 1 zobrazuje vztah mezi představou o trvanlivosti betonu a provedením. V obrázku je naznačeno, že působení tepla, vlhkosti a chemických látek společně s okolním prostředím a s parametry určujícími transportní mechanismus zásadním způsobem ovlivňují trvanlivost.



Obr. 1 – Činitelé ovlivňující trvanlivost a životnost, vzájemné vztahy

^{*)} Absorpce je proces, při kterém se kapalina dostává a následně vyplňuje propustné póry v hutném pórovitém tělese; též zvětšení hmoty hutného pórovitého tělesa vlivem penetrace tekutiny do propustných pórů. Propustnost (permeability) je definována jako volné pronikání tekutiny v hutném materiálu. Difuze je pronikání jednoho média do druhého.

^{†)} včetně mikrotrhlin

Rozsah a vliv transportu kapalin významně závisí na pórové struktuře betonu (velikosti a rozložení), přítomnosti trhlin a mikroklimatu na povrchu betonu. Základní transport, v betonu neporušeném trhlami, je převážně přes póry v cementovém tmelu v transportní zóně (v oblasti mezi hrubými částmi kameniva a hydratovaným cementovým tmelem).

Beton je obecně více propustný než samotný cementový tmel, vzhledem k přítomnosti mikrotrhlin mezi tmelem a kamenivem v transportní zóně. Tabulka č.1 ukazuje příklady hodnot difuze chloridů a propustnosti pro beton s kamenivem z drceného vápence vel. zrn max. 19 mm (podle tab. č. 2^{*)}). Z hlediska trvanlivosti je třeba sledovat transportní procesy jako prostou difuzi, difuzi a zpětnou vazbu, nasávání (kapilární sání) a pronikání škodlivých látek a vody.

Při výrobě trvanlivých betonových konstrukcí musí být zohledněny:

- podmínky prostředí (druh a intenzita vlivu prostředí)
- specifická doporučení týkající se očekávané formy agresivního chemického nebo fyzikálního napadení (např. navrhnout konstrukci tak, aby bylo zabráněno akumulaci vody).

Očekávané prostředí má obecně vliv na návrh třídy betonu a jeho složení (např. pevnost, vodní součinitel, a obsah cementu), a na detaily (tloušťka krycí betonové vrstvy a pod.) - viz ČSN EN 206-1.

2.2.1 Chemické napadení – Chemické napadení způsobuje změnu betonu vlivem chemické reakce s cementovým tmelem, kamenivem nebo vloženou výztuží. Obecně k napadení dochází na exponované části povrchu betonu (krycí vrstvě), ale při výskytu trhlin nebo delší expozici, dochází k napadení i ve vnitřní části průřezu. Případy chemického rozrušování mohou být rozděleny do tří kategorií:

- 1) hydrolýza cementového tmelu hladovou vodou;
- 2) reakce s výměnou kationtů mezi agresivními kapalinami a cementovým tmelem;
- 3) reakce vedoucí k tvorbě rozpínavých produktů.

Výsledkem dlouhodobě působící chemické agresivity jsou vady různého stupně závažnosti – od drobných vzhledových vad až po ztrátu části průřezu a homogenity konstrukce. Toto poškození může být doprovázeno chemickým napadením zabudované ocelové výztuže.

2.2.1.1 Vylouhování – Čistá voda, která obsahuje velmi malé množství nebo žádné vápenaté ionty, nebo podzemní voda s rozpuštěným oxidem uhličitým (kyselinou uhličitou) či hydrogenuhličitanovými ionty způsobuje hydrolýzu nebo rozpouštění alkalických oxidů a produktů obsahujících vápenaté ionty. Tím dochází ke zvýšení propustnosti betonu. Stupeň vylouhování závisí na množství rozpuštěných solí obsažených v prosakující kapalině, rychlosti pronikání kapaliny cementovým tmelem a na teplotě. Stupeň vylouhování může být snížen minimalizováním množství vody pronikající betonem (přerušená kapilarita), použitím málo propustného betonu nebo nepropustné bariéry. Faktory ovlivňující výrobu málo propustného betonu jsou – nízký vodní součinitel, odpovídající obsah cementu, pucolánové přísady a správné hutnění a ošetřování betonu. K výrobě málo propustného betonu mohou být též použity úpravy polymery. Obdobná pozornost by měla být věnována velikosti kameniva a křivce zrnitosti, napětím vlivem teploty a smršťování, zamezení zatížení, které způsobí vznik trhlin a návrh, který minimalizuje působení vlhkosti. Požadavky předpisů a návrhových směrnic na vodní součinitel jsou obecně založené na pevnosti a podmínkách expozice.

*) Prezentované výsledky jsou platné pro danou zkušební metodu a mohou být odlišné při použití jiné metody.

Tab. 1 – Příklady transportu chloridů a propustnosti vybraných druhů betonů [4].

Beton ¹⁾ č.	Čas (dny)	Rychlý test propustnosti pro chloridy ²⁾ ; celkový náboj (Coulomb)	90-denní test (%Cl ⁻ na hmotnost betonu ³⁾)	Propustnost (μDarcys ^{§)})		Pórovitost (% objemu)
				voda	vzduch	
1	1	44	0,013	**)	37	8,3
	7	65	0,013	*	29	7,5
2	1	942	0,017	*	28	9,1
	7	852	0,022	*	33	8,8
3	1	3897	0,062	0,030	130	11,3
	7	3242	0,058	0,027	120	11,3
4	1	5703	0,103	0,560	120	12,4
	7	4315	0,076	0,200	170	12,5
5	1	5911	0,104	0,740	200	13,0
	7	4526	0,077	0,230	150	12,7
6	1	7065	0,112	4,100	270	13,0
	7	5915	0,085	0,860	150	13,0

Tab. 2 – Složení betonu – v návaznosti na tab. č. 1 [5]

Beton č.	Množství (kg/m ³)				Příměsi ^{††)}	v/c	Sednutí kužele (mm)	Obsah vzduchu (%)
	Cement	Jemné kamenivo	Hrubé kamenivo	Voda				
1	446	752	1032	132	A+B	0,258 ^{††)}	119	1,6
2	446	790	1083	128	C	0,288	89	2,0
3	381	784	1075	153	D	0,401	89	2,3
4	327	794	1088	164	-	0,502	94	2,1
5	297	791	1086	178	-	0,600	107	1,8
6	245	810	1107	185	-	0,753	124	1,3

^{*)} složení betonů viz tabulka 2^{†)} 3% roztok NaCl^{‡)} průměr ze tří vzorků odebraných v hloubce od 2 do 40 mm^{§)} 1 μDarcy = 9,87*10⁻⁷ m²^{**)} hodnoty příliš malé, neměřitelné^{††)} A=Microsilica fume at 59,4kg/m³; B, C, D = přídavky různých druhů plastifikátorů v různém množství^{‡‡)} Pro beton č.1 vyjádřeno jako poměr vody k celkovému obsahu cementového materiálu

2.2.1.2 Zpožděné ettringitové formace – U konstrukcí, kde vznikají zpožděné ettringitové formace (DEF), se může projevit vznik trhlin vlivem rozpínání. K potížím může dojít při intenzivním propařování při výrobě betonových prvků, které zabrání rozpadu ettringitových formací, které se tvoří při hydrataci portlandského cementu. Používání cementů s vysokým obsahem síry, která je obtížně rozpustná může být též příčinou vzniku DEF. Ettringit je produktem reakce mezi ionty síry, hlinitanu vápenatého a vody. Pokud je konstrukce náchylná na DEF vystavena působení vody, dojde ke změně ettringitu na krystaly, které výrazně nabývají na objemu a dojde ke vzniku tahových trhlin v betonu. Rozsah rozvoje DEF je závislý na obsahu síry využitelné pro pozdější rozvoj ettringitu a na přítomnosti vody v betonové konstrukci během doby její životnosti. Zvýšená teplota též zvyšuje možnost poškození konstrukce vlivem DEF. Prevence nebo minimalizování vzniku DEF může být zajištěna snížením teploty při propařování, snížením obsahu síranů v cementovém slínku a zamezením přístupu vody do konstrukce. DEF způsobuje degradaci betonu, která snižuje jeho pevnost a zvyšuje propustnost.

2.2.1.3 Síranová koroze – Síraný obsažené v kamenivu, zemině a spodní vodě reagují s hydroxidem vápenatým a s trikalciinaluminátem (C_3A). Síraný jsou přítomny hlavně v zeminách tvořených jíly a dále v důlních vodách a vodách z blízkosti zdrojů průmyslového znečištění životního prostředí. Při síranové korozi dochází k nahromadění a krystalizaci solí či reakčních produktů a k počátečnímu zhutnění struktury, které je spojeno s nárůstem pevnosti. Po této etapě následuje rychlé snížení pevnosti. Síranová koroze je komplexní proces, který je složen z řady reakcí. Z praktických a laboratorních zkoušek vyplývá jednoznačná korelace mezi obsahem C_3A v cementu a odolností vůči síranové korozi. Při síranové korozi se uplatňují tyto reakce: nejprve jde o vytváření hydratovaného sulfátoaluminátu-ettringitu (sulfátoaluminátová koroze), při němž se objem cementové pasty může zvýšit až 4,7x a následně vytváření sádrovce (sádrovcová koroze). Sádrovcová koroze je iniciována počáteční reakcí mezi hydroxidem vápenatým a síranovými ionty. Tato reakce je také spojena se zvětšením objemu (asi o 17%), projevuje se až při vyšších koncentracích síranů ve vodách, které jsou s betonem ve styku (více než 1000mg síranů/l). Při nižších koncentracích síranů dochází k přímému pronikání síranových iontů do hmoty betonu a ke vzniku ettringitu.

2.2.1.4 Napadení kyselinami a louhy - Kyseliny po promísení s vápenatými sloučeninami vytvoří v hydratovaném cementovém tmelu rozpustné složky, které se snadno vylouhují z betonu a zvyšuje se tak pórovitost a propustnost. Hlavní faktory určující rozsah napadení je typ kyseliny, její koncentrace a hodnota pH. Pokud jsou reakční produkty málo rozpustné, ulpívají na povrchu betonu a zpomalují tím přístup agresivních škodlivin do vnitřku betonu. Vrstva reakčních produktů vzniká postupně v časové závislosti na době korozního působení a proto na počátku působení, kdy je difusní odpor malý, je rychlost koroze značná a je dána rychlostí chemické reakce. Agresivita vod s obsahem kyselin vůči betonu s obvyčejnou hutností je výrazná při pH nižším než 6. Při pH nižším než 4 je ochrana betonového díla před korozi již velmi obtížná. K odolnosti proti působení kyselin jsou doporučovány ochranné bariéry (vrstvy), avšak při působení vod o nižších hodnotách pH je často jejich trvanlivost problematická.

2.2.1.5 Alkalická reakce - Rozpínání a vznik trhlin vedoucí ke ztrátě pevnosti, tuhosti a trvanlivosti betonu je výsledkem chemické reakce alkalických iontů z portlandského cementu. Určitý druh kameniva jako např. reaktivní formy oxidu křemičitého reagují s draslíkem, sodíkem a hydroxidem vápenatým z cementu a vytvářejí gel kolem reagujících zrn kameniva. Pokud je gel vystaven zvýšené vlhkosti dojde k jeho rozpínání a následně dochází ke vzniku tahových trhlin v betonu. Při vizuální kontrole je na povrchu porušeného betonu patrná síť trhlin zpravidla vyplněných gelem vznikajícím při reakci kameniva. Po vzniku trhlin na

povrchu betonu dochází k pronikání další vody do konstrukce, alkalická reakce se urychluje a dochází i k poškození konstrukce mrazem. Zabránit vzniku alkalické reakce je možné pouze použitím vhodného kameniva a cementu. U hotových konstrukcí je nutné zamezit přístup vlhkosti do konstrukce. Při provádění průzkumu pro stanovení doby životnosti je nutné zajistit petrografický nebo chemický rozbor vzorků betonu odebraných z konstrukce, i když nejsou patrné žádné viditelné stopy na povrchu betonu.

2.2.1.6 Koroze ocelové výztuže - Koroze ocelové výztuže v betonu je elektrochemický proces, při kterém dochází k nerovnoměrnému koroznímu napadení (bodová či štěrbínová koroze,...aj.) a/nebo k rovnoměrnému plošnému koroznímu napadení. Pro rozvoj koroze je třeba současného působení vody a kyslíku. Výztuž uložená v betonu s odpovídající krycí vrstvou není náchylná ke korozi, protože vysoce alkalické podmínky ($\text{pH} > 12$) vytváří podmínky pro tvorbu pasivního oxidického filmu na ocelovém povrchu. Karbonatace a přítomnost chloridových iontů mohou tento ochranný film porušit. Koroze výztuže může být rovněž urychlena přítomností bludných proudů. Pronikající oxid uhličitý z okolního prostředí snižuje hodnotu pH betonu a vápenaté a alkalické oxidy mění na uhličitany. Obecně je průnik CO_2 pomalým procesem závislým na propustnosti betonu, vlhkosti betonu, obsahu CO_2 a okolní relativní vlhkosti (RH). Karbonatace může být urychlována přítomností trhlin nebo zvýšenou pórovitostí betonu. Betony s nízkou propustností mají, pokud byly správně ošetřovány, vyšší odolnost proti karbonataci. Též zvětšení tloušťky krycí betonové vrstvy oddálí počátek koroze vlivem karbonatace. Přítomnost chloridových iontů je nepochybně hlavní příčinou koroze zabudované ocelové výztuže. Chloridové ionty se běžně v přírodě vyskytují a malé množství může být obsaženo ve složkách betonu. Možnými vnějšími zdroji chloridů jsou urychlovací přísady (jako chlorid vápenatý) nebo rozmrazovací soli. Maximální možný obsah chloridových iontů, stejně jako požadavky na minimální tloušťky krycí vrstvy jsou v příslušných předpisech. Ke stanovení obsahu chloridů v betonu jsou běžně používány dvě metody: metoda využívající výluh kyselinou (celkový obsah) a metoda s vodním výluhem. Limitní hodnoty chloridových iontů jsou dány typem prvku (předpjatý beton, nebo železobeton) a podmínkami expozice (sucho nebo vlhko). Protože voda, kyslík a chloridové ionty jsou důležité faktory pro vznik koroze výztuže, je propustnost betonu klíčová pro kontrolu tohoto procesu. Beton by měl být navržen tak, aby byla zajištěna nízká propustnost, použitím nízkého vodního součinitele, odpovídajícím obsahem cementu, správnou velikostí a vhodnou křivku zrnitosti kameniva a minerálních přísad. K vyloučení působení vnějších zdrojů chloridových iontů na stávající konstrukce je třeba použít vodotěsnou izolaci, impregnaci polymery a další součásti izolačního souvrství. Dále je uvažována též možnost zvýšení odolnosti výztuže proti korozi použitím odolnějších materiálů pro výztuž, např. korozivzdorných ocelí, nebo aplikací ochranných povlaků z korozivzdorných ocelí na povrch výztuže, aplikace katodických či anodických povlaků, práškových plastů, užití chemických přísad (inhibitorů koroze), nebo aplikace katodické ochrany u stávajících konstrukcí. Odolnost konstrukce může být též zvýšena vhodným návrhem detailů, tak aby byla odváděna vlhkost. V rámci provádění údržby je též vhodné co nejvíce omezit vystavení konstrukce působení vlivu chloridů a jiných agresivních chemikálií. Koroze předpínací výztuže (tj. vysokopevnostní oceli, která se používá pro předem a dodatečně předpjatý beton), probíhá podobným způsobem jako v případě betonářské výztuže[†]. Přítomné napětí může navíc způsobit degradaci vlivem korozní únavy, korozního praskání za napětí

* Běžně udávaná přibližná prahová koncentrace chloridů způsobující rozvoj korozního napadení je ca 0,4% chloridů (vztaženo na hmotnost cementu); pro předpjatý výztuž se v odborné literatuře vyskytují i nižší prahové koncentrace.

[†] Běžná betonářská výztuž může za určitých podmínek rovněž podléhat druhům korozního napadení zde uváděných pro vysokopevnostní ocel.

a vodíkového křehnutí.* Na vytváření prostředí přispívajícího rozvoji korozního procesu se v určitých případech mohou také podílet mikroorganismy, jejichž vysoce kyselé produkty metabolismu mohou ovlivnit lokality v okolí výztuže. Korozní předpínací výztuže může být vysoce lokalizována nebo rovnoměrná. Nejčastěji jde o nerovnoměrné formy korozního poškození: korozní praskání za napětí, vodíkové křehnutí, bodovou korozi a nebo jejich kombinaci. Bodová koroze je proces, jehož výsledkem je lokální průnik do oceli a oslabení průřezu, které není schopno přenést zatížení. Korozní praskání za napětí se projevuje křehkým lomem u normálně tvárného kovu nebo slitiny pod napětím ve specifickém korozním prostředí. K vodíkovému křehnutí, projevujícímu se znatelnou redukcí tažnosti pronikáním atomů vodíku do mřížky kovu, může u dodatečně předpjaté konstrukce také dojít vlivem nesprávné aplikace katodické ochrany; v určitých případech se na urychlení procesu degradace také podílejí bludné proudy. Vzhledem k velikosti zatížení předpínacího systému je tolerance pro korozi mnohem menší než pro běžnou výztuž. Na vodíkovém křehnutí se může v některých případech také spolupodílet sulfan, jehož zdrojem může být mikrobiální činnost nebo jiné vnější zdroje. Protikorozní ochrana je zajišťována umístěním předpínacích kabelů do plastových trubek nebo ocelových hadic vyplněných mikrokrytalickými vosky s inhibitory koroze na bázi organických látek (volné kabely), nebo injektážní maltou (zainjektované kabely). Degradace předpínací i běžné výztuže má pro životnost konstrukce většinou rozhodující význam.

2.2.2 Fyzikální napadení – Fyzikální napadení obecně zahrnuje degradaci betonu vlivem působení prostředí. Projevuje se dvěma formami: povrchovým opotřebením a trhlinami. Může vést ke snížení trvanlivosti, protože výsledné trhliny mohou umožňovat přímé cesty pro vstup škodlivě působících látek (například chloridů) k ocelové výztuži.

2.2.2.1 Krystalizace solí – Tvorba solí způsobuje vznik trhlin v betonu vlivem narůstajícího tlaku, ke kterému dochází v případech opakované krystalizace při odpařování vody s obsahem solí ve volných pórech. Konstrukce, které jsou v kontaktu s proměnnou hladinou vody, nebo hladinou podzemní vody, která obsahuje velké množství rozpuštěných solí (síran vápenatý CaSO_4 , chlorid sodný NaCl , síran sodný Na_2SO_4) jsou náchylné k tomuto typu degradace. Současně též dochází k uplatnění chemické agresivity, přímo a nebo chemickou reakcí s cementem nebo kamenivem. Jedním z nápravných postupů při problému krystalizace solí je aplikace utěsnění nebo bariéry, která zabrání pronikání vody a jejímu následnému vypařování, ale pokud není utěsnění spolehlivě navrženo a aplikováno, může docházet ke zvýšení vlhkosti v betonu a nezabrání se tak vzniku krystalizace v betonu.

2.2.2.2 Účinky mrazu - Pokud je beton nasycený nebo téměř nasycený vodou, je náchylný k porušení vlivem zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů, ke kterým dochází přírodními vlivy nebo při průmyslovém provozu. Poškození je způsobeno hydraulickým tlakem, který vzniká v kapilárních dutinách cementového tmelu nasyceného vodou, která zmrzne. Faktory ovlivňující odolnost betonu proti zmrazovacím cyklům jsou provzdušnění (velikost a vzdálenost vzduchových dutin), vodotěsnost, pevnost a stupeň nasycení. Též je důležitý výběr trvanlivého kameniva. Jsou též dány požadavky na maximálně dovolený vodní součinitel v/c , v závislosti na tloušťce betonové krycí vrstvy a přítomnosti agresivních činidel, jako rozmrazovací soli. Protože je velmi důležitý stupeň nasycení vodou, je důležité, aby byly betonové konstrukce navrženy a provedeny s dobrým odvodněním. Konstrukce prováděné bez dostatečného provzdušnění budou vystaveny zvýšenému riziku poškození vlivem zmrazovacích cyklů.

* v anglicky psané odborné literatuře jde o pojmy: „corrosion fatigue“, „stress corrosion cracking“ a „hydrogen embrittlement“

2.2.2.3 Abrazie, eroze a kavitace - Abrazie, eroze a kavitace betonu se projevují úbytkem materiálu na povrchu konstrukce. Abrazie se obecně týká opotřebení za sucha a k erozi dochází působením kapaliny s příměsí tuhých částic. Kavitace způsobuje úbytek materiálu na povrchu vytvářením odpařovacích bublin a jejich náhlým porušením. Odolnost betonu proti abrazi a erozi je dána pevností cementového tmelu, odolností jemného a hrubého kameniva, druhem povrchové úpravy a způsoby ošetřování betonu. Ke zvýšení odolnosti proti abrazi je používána speciální povrchová úprava nátěrem ze směsi cementu a tvrdého kameniva. Abrazie a eroze může u nekontrolovaných konstrukcí přerůst z kosmetických závad do vážných poruch během velmi krátké doby.

2.2.2.4 Tepelné poškození – Ohřev konstrukce může způsobit vznik trhlin a nebo při vysokých teplotách i odpadávání krycí betonové vrstvy. Odolnost betonu při kolísání denních teplot je zajištěna vloženou betonářskou výztuží. Obecně jsou bez nutnosti umělého ochlazování přípustné teploty do 65 °C, lokálně do 90 °C. Při těchto teplotách může dojít ke vzniku ettringitových formací (DEF), pokud je beton vystaven i účinkům vlhkosti. Při vyšších teplotách dochází ke snížení pevnosti betonu a musí být proveden nový statický výpočet.

2.2.3 Kombinované vlivy – Degradace betonu, zvláště v jeho pokročilejším stupni, je zřídka výsledkem jednoduchého mechanismu. Chemické a fyzikální příčiny degradace jsou obecně tak propojeny, že separace jednotlivých vlivů není často možná. Pro hodnocení zbytkové životnosti betonu vystaveného kombinovaným vlivům při degradaci působením mrazu (povrchové vrstvy) a působením koroze ocelové výztuže je dostupné pouze omezené množství informací.

2.3 Vztah mezi zatížením a návrhem konstrukce

2.3.1 Materiály a provedení konstrukce musí splňovat požadavky platných norem a předpisů (TKP, atd.). Parametry typových betonů jsou uvedeny v ČSN a jsou stanoveny tak, aby splňovaly požadavky z hlediska trvanlivosti betonu v návaznosti na vliv agresivity prostředí.

2.3.2 V normách pro navrhování jsou stanoveny hodnoty charakteristických zatížení, jejich kombinace a konstrukční požadavky, rovněž v návaznosti na vliv prostředí. Předpokládá se, že splnění těchto požadavků zajistí (při prováděné údržbě) požadovanou životnost konstrukce nebo její části. Pokud je konstrukce navržena s určitou rezervou, je pak vytvořen předpoklad k tomu, že při splnění shora uvedených požadavků bude zajištěna požadovaná životnost, popř. životnost delší.

2.3.3 Při návrhu konstrukce musí být splněna podmínka:

$$S_r \text{ (odolnost)} > S_d \text{ (účinek zatížení, prostředí)}$$

2.3.4 V mezních stavech únosnosti se pravděpodobnost zatížení vyjadřuje dílčími součiniteli zatížení a pravděpodobnost vlastností materiálů dílčími součiniteli spolehlivosti vlastností materiálů. V posouzení musí být zahrnuta i nejistota modelu konstrukce. Tito součinitelé zahrnují i hledisko trvanlivosti.

2.3.5 Při posouzení mezních stavů použitelnosti je třeba z hlediska trvanlivosti:

- omezit napětí materiálů na přípustné hodnoty;
- posoudit deformace (obvykle svislý průhyb);
- posoudit vznik a šířku trhlin;
- přihlédnout k opakovanému namáhání a posoudit jak beton, tak i výztuž na únavu.

Kritéria v normách jsou stanovena na základě zkoušek materiálů a jsou v nich zohledněny dlouholeté zkušenosti, pozorování a prohlídky konstrukcí a jejich experimentální ověřování.

2.4 Interakce účinků zatížení konstrukce a prostředí

2.4.1 Vlivy prostředí - Při návrhu konstrukce je třeba minimalizovat nebo eliminovat všechny nepříznivé vlivy prostředí. To ovšem nemusí poskytnout dostatečnou záruku životnosti konstrukce ve skutečných podmínkách. Požadovaná únosnost (zatížitelnost) konstrukce v průběhu jejího trvání závisí na tom, že nebudou porušeny jednotlivé části konstrukce nebo konstrukce jako celek.

2.4.2 Pro účely stanovení životnosti konstrukce je třeba zaznamenat její změny v průběhu času vlivem působení zatížení a prostředí. Poškozené prvky vyžadují často doplňková statická posouzení schopnosti konstrukce nebo její části přenášet požadované provozní zatížení.

2.4.3 Podkladem pro odhad únosnosti (zatížitelnosti) může být i zatěžovací zkouška, která má být navržena tak, aby nevyvolala poruchy (trhliny), které by vedly k degradaci konstrukce a ke snížení její použitelnosti a trvanlivosti.

2.4.4 Sledování degradace materiálu v laboratorních podmínkách na vzorcích nemusí vést ke správným závěrům a je nutná inženýrská interpretace na konstrukci in situ.

2.4.5 Nepříznivé účinky prostředí na životnost konstrukce jsou způsobeny zejména přítomností vlhkosti a prostupem vlhkosti nebo jiných látek betonem. Mechanismus transportu je závislý na mikrostruktuře betonu, kterou charakterizuje síť pórů a trhlin v betonu. Uspořádání pórů závisí na kvalitě betonu, zatímco trhliny v betonu se objevují vlivem vnějšího zatížení a (vnitřních napětí). Rozložení pórů lze zjistit tzv. porozimetrií. Přítomnost trhlin v betonu lze určit vizuální prohlídkou a pomocí mikroskopů. Zkoušky prokázaly vztah mezi mikrostrukturou a propustností, který by se mohl využít při stanovení zbývajících životnosti konstrukce. Detailní určení a popis těchto vztahů si vyžádá ještě ověření.

2.5 Vliv postupu výstavby

Projektová dokumentace, specifikace a požadavky na provedení konstrukce zásadně ovlivňují výstavbu betonových konstrukcí a zároveň i dobu provozní

životnosti. Kritéria trvanlivosti, šířka trhlin, tloušťka krycí vrstvy a úroveň napětí jsou stanoveny během návrhové fáze a jsou zohledněny v projektu a specifikacích a v dalších příslušných předpisech.

Za provádění konstrukce zodpovídá zhotovitel. Většinou použité stavební metody splní požadavky projektové dokumentace a specifikací. Avšak v některých případech nejsou záměry projektu a specifikací splněny – buď pro nepochopení, chybu, zanedbání nebo úmyslně nesprávný výklad. Vyjma úmyslného nesprávného výkladu každý z těchto předpokladů může být projednán při kontrole stavebních postupů. Ke snížení provozní životnosti může dojít v kterékoli ze čtyř fází stavby: při dodávce materiálu a jeho certifikaci, při vlastním provádění stavby, dokončování a ošetřování a následnou výstavbou. S výjimkou dodávky a certifikace materiálu je každé stádium a jeho vliv na provozní životnost popsáno v následujících odstavcích.

2.5.1 Vlastní provádění stavby

2.5.1.1 Zemina/podloží - příprava pro uložení bednění

Nekvalitní příprava pláně/podloží může mít vliv na nadměrné nebo nerovnoměrné sedání. To může způsobit vychýlení jednotlivých prvků a nebo trhliny v betonu. Počáteční příprava a montáž bednění nezajišťují pouze celkové rozměry konstrukce, ale mají též vliv na určité detaily vyztužení a provedení konstrukce. Příklady vlivů těchto faktorů na provozní životnost jsou shrnuty následovně:

Předpoklad	Možný vliv na provozní životnost
Nekvalitní příprava pláně/podloží	Poškození konstrukce jako trhliny, posunutí dílů, vychýlení
Příliš široké bednění	Nadměrná hmotnost betonu, možnost dlouhodobé deformace, nebo trhlin
Nerovné nebo mělké bednění	Zmenšení únosnosti konstrukce, nadměrný průhyb nebo trhliny
Bednění příliš hluboké	Pravděpodobně žádný, při zvětšení konstruktivní výšky je nadměrná hmotnost kompenzována zvětšením únosnosti průřezu, jinak stejné jako u širokého bednění
Nerovné bednění	Nadměrné zvlnění se projeví na tloušťce krycí betonové vrstvy, snižuje soudržnost a zvyšuje možnost korozního napadení

2.5.1.2 Uložení výztuže

Tolerance pro uložení výztuže jsou dány v příslušných předpisech. Tyto dokumenty jsou uvedeny v technických specifikacích projektu. Odchytky od normových hodnot mohou mít vliv na provozní životnost, tak jak je uvedeno dále:

Předpoklad	Možný vliv na provozní životnost
Výztuž mimo předepsanou polohu	Vznik trhlin pro nedostatečnou únosnost
Nedostatečná tloušťka krycí betonové vrstvy	Urychlení rozvoje korozního procesu, možnost snížení soudržnosti, snížení odolnosti proti ohni
Nadměrná tloušťka krycí betonové vrstvy	Možnost snížení únosnosti, zvětšení průhybu, zvětšení šířky trhlin na povrchu, snížení rizika korozního napadení
Nedostatečná vzdálenost prutů výztuže	Nedostatečné probetonování průřezu, následné snížení soudržnosti, dutiny, zvětšení průhybu a trhlin, zvýšení rizika korozního napadení
Nesprávná poloha kabelových kanálků	Nepatřičná napětí vlivem odchylek v předpětí
Kontaminovaná injektážní malta nebo nevhodné užití inhibitoru koroze	Zhoršení stavu (degradace) předpínacího systému

2.5.1.3 Výroba a dodávka betonu

Beton může být vyráběn přímo na stavbě a nebo v betonárce a dopravován na stavbu. Vliv na provozní životnost mají chyby při výrobě, nesprávná funkce zařízení nebo nesprávná příprava. Mnoho operací při výrobě betonu je spojeno s využitím zařízení řízených počítačem. Zdrojem chyb jsou nedostatky v kalibraci zařízení nebo výběru nevhodné receptury. Pravidelná údržba a kalibrace zařízení zaručuje kvalitní výrobu betonu. Protože výrobní betonu mají běžně několik set záměsí za den, je pravděpodobnost chybné záměsi velká. Chyby jako zanedbání provzdušnění, nadměrné množství vody nebo nízký obsah cementu mají zásadní vliv na provozní životnost.

Příprava zařízení je zdrojem dalších vlivů. Například voda ponechaná v bubnu autodomíchávače, která je smíchána s novou dávkou betonu, nepříznivě zvýší vodní součinitel. Tento vliv je kumulativně škodlivý pro životnost vzhledem ke snížení pevnosti, zvětšení smršťování, vzniku trhlin nebo větší nasákavosti.

Dalšími faktory ovlivňujícími kvalitu záměsi je teplota okolí, doba přepravy a kontrola její kvality při dodávce betonu. Postup pro zajištění kvality betonu je zpracován v příslušných normách.

Zpracovatelnost v době dodání směsi na stavbu, měřená zkouškou sednutí kužele, je též jednou z podmínek požadované životnosti. Nízká hodnota sednutí kužele je často zvyšována přidáním vody do záměsi na stavbě. Když celkový objem vody nepřesáhne předepsanou hodnotu, není kvalita betonu a tím i životnost narušena. Pokud ale celkový objem přesáhne požadovanou hodnotu, potom zvětšený vodní součinitel ovlivní provozní životnost.

2.5.1.4 Betonáž

Správně provedená betonáž, včetně hutnění a uhlazení povrchu, je důležitá pro provozní životnost betonových konstrukcí. Nedostatek kvalitního hutnění vede ke snížení pevnosti, zvýšení nasákavosti, ztrátě soudržnosti a ztrátě smykové nebo ohybové pevnosti, což ve výsledku snižuje provozní životnost zrychlením odezvy na korozivitu prostředí, zvětšením průhybů nebo přispívá k předčasným poruchám.

2.5.2 Konečná úprava a ošetřování

Nekvalitní úprava povrchu a ošetřování betonu vede k předčasné degradaci betonu a snížení provozní životnosti (například při vytvoření pórovitého a drsného povrchu krycí betonové vrstvy). Dále jsou uvedeny příklady, které mají běžně vliv na životnost konstrukcí:

Předpoklad	Možný vliv na provozní životnost
Přidání vody při dokončování nebo odstranění vody zateklé na povrch	Prašnost, odlupování, zpuchýřování nebo předčasné porušení povrchu a ztráta povrchové pevnosti.
Nedostatečné ošetření betonu	Nadměrné smrštění, nižší pevnost, trhliny nebo zvlnění.
Použití chloridu vápenatého	Degradace zabudované betonářské výztuže.

2.5.3 Následná výstavba

Železobetonové konstrukce jsou zřídka dokončeny během jedné etapy provádění. Dokončovací nebo následné stavební práce mohou významně ovlivnit životnost konstrukce pokud není beton dostatečně vyzrálý. Dva následující příklady ukazují, jak může být tímto způsobem ovlivněna životnost:

2.5.3.1 Podpurná skruž a odskržení

Předčasné odstranění bednění vede ke vzniku trhlin dotčených prvků. Trhliny snižují tuhost desky, zvětšují počáteční průhyb a následné dotvarování. I když beton následně získá požadovanou pevnost, je průhyb trhlínami poškozeného prvku větší v porovnání s neporušeným prvkem. Poškozený prvek více podléhá vlivům agresivního prostředí.

2.5.3.2 Dilatace

Dilatace jsou na mostech a dalších objektech PK určeny k vyrovnání deformací konstrukce vlivem dotvarování, smršťování a teploty. Nesprávně navržené nebo provedené dilatační spáry mohou vést k nadměrnému vzniku trhlin, poruše vodotěsnosti, pronikání vlhkosti do konstrukce a k problémům při provádění údržby. Pronikání vody přes porušený mostní závěr může způsobit zablokování ložisek, lokální poruchy ložisek, porušení těsnících materiálů, zrychlenou degradaci prvků nosné konstrukce a spodní stavby a její nepěkný vzhled.

3 PROVOZNÍ PROHLÍDKY, PODMÍNKY HODNOCENÍ A ZBYTKOVÁ PROVOZNÍ ŽIVOTNOST

3.1 Úvod

Určení a hodnocení velikosti a stupně vlivu prostředí ve vztahu k degradaci jsou klíčové pro stanovení životnosti a udržení provozních požadavků železobetonových konstrukcí. Je třeba použít vhodný model degradace, který po zadání požadovaných dat umožní určení stávajícího stavu a jeho dalšího vývoje. Model by měl zohledňovat vývoj provozu, materiálové a geometrické charakteristiky, stávající poškození, statické posouzení a úplný degradační model. Jako doplněk by metodika měla též obsahovat schopnost hodnocení úlohy údržby na prodloužení životnosti konstrukce.

Na obr. 2 je znázorněn vývojový diagram pro metodiku doporučenou jako návod při hodnocení bezpečnosti betonových konstrukcí [6]. Tento diagram je upravený podle postupu pro určení stavu objektu [7]. Tato kapitola podává informace k určení stávajícího stavu a hodnocení zbytkové životnosti. Podrobnosti metodiky hodnocení se zaměřením na mostní konstrukce jsou uvedeny v příloze A těchto TP.

3.2 Hodnocení stárnutí železobetonu nebo účinků degradace

Provedení konstrukce je posuzováno na základě fyzického stavu a funkčnosti jednotlivých konstrukčních materiálů. Pro důkaz chyb v provedení konstrukce jsou prováděny zkoušky [8]. Musí být voleny tak, aby jejich výsledek ukázal na:

- neshody se specifikacemi;
- nevhodné provedení betonáže, hutnění, nebo ošetřování betonu;
- poškození způsobené přetížením, únavou, mrazem, abrazí, chemickou agresivitou, ohněm, výbuchem nebo jinými vlivy prostředí;
- neshody týkající se parametrů konstrukce.

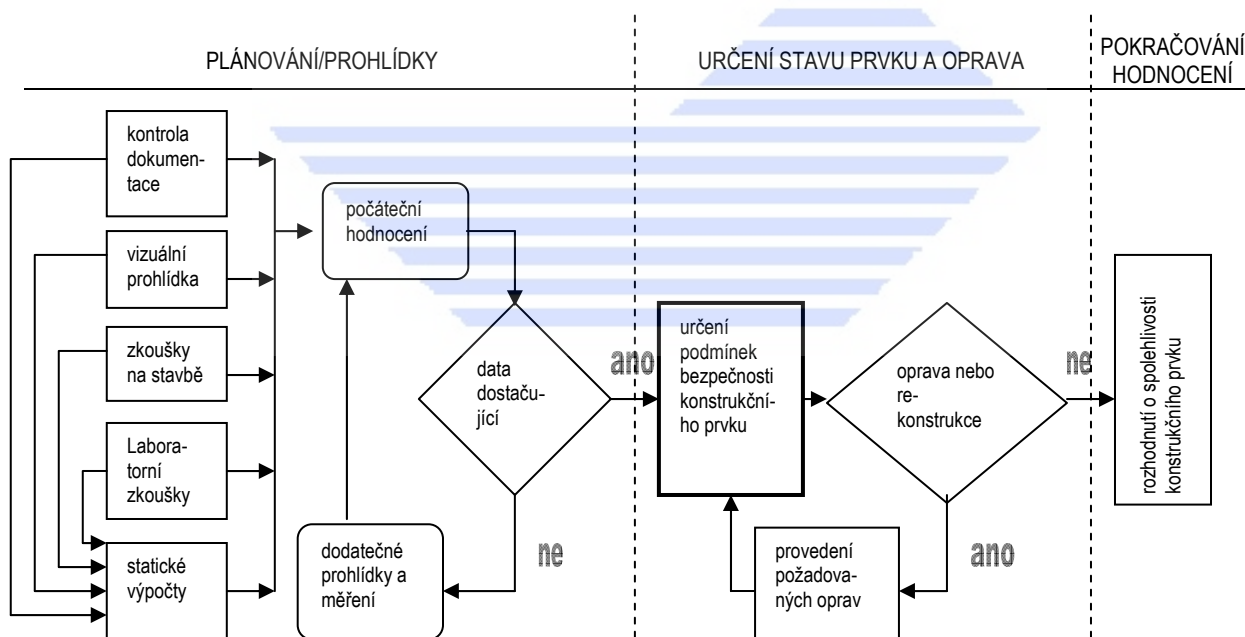
Zkoušky jsou též prováděny k ověření modelů (statických), materiálů a parametrů vnějšího prostředí použitých při stanovení životnosti ve fázi projektu. Platné a ověřené modely jsou následně použity pro optimalizaci provozu a údržby objektu. Předpověď zbytkové životnosti betonové konstrukce vyžaduje získání dat tak, jak uvádí tab. 3.

Je třeba ověřit, že stav konstrukce je takový, jaký je předepsán v projektu (ve výkresové dokumentaci, dokumentaci skutečného stavu, předepsaného zatížení) a vyšetřit degradaci. Před výpočty stanovení životnosti je důležité určit, jaké množství údajů bude nutné nashromáždit, požadavek přesnosti stanovení, finance použitelné pro provedení předpovědi, stejně jako následná úroveň prohlídek, údržby a oprav.

Schopnost železobetonové konstrukce plnit stanovené požadavky během určitého období závisí především na trvanlivosti jejích konstrukčních částí. Techniky k určení porušení jednotlivých prvků jsou zaměřeny na beton, výztuž a kotvení.

3.2.1 Betonové konstrukce

Prvotní projevy poškození železobetonových konstrukcí se projevují trhlinami a odpadáváním krycí betonové vrstvy (trhliny ve směru výztuže), nadměrnými průhyby a ztrátami mechanických vlastností (pevnost). To, zda byl beton správně dávkován, byly použity správné složky a poměr mísení a nebo bylo provedeno řádné ošetřování a hutnění jsou důležité údaje, které mají též zásadní vliv na životnost konstrukce. Zkoušky propustnosti prováděné na konstrukci jsou vhodné k lokalizaci ploch více náchylných k degradaci. Obecné požadavky na diagnostický průzkum a vybrané zkušební metody jsou uvedeny v TP 72 a 121.



Obr. 2 – Metodika hodnocení betonového prvku [9]

Tab. 3 – Informace potřebné ke stanovení životnosti

1. Porovnání konstrukce s projektovou dokumentací
1) Prohlídka stavby - vizuální prohlídka k porovnání projektové dokumentace - určení množství polohy a profilu výztuže a tloušťky krycí vrstvy (elektromagneticky) 2) Porovnání dokumentace se skutečným provedením 3) Předběžné statické posouzení
2. Prohlídka k určení poškození, diagnostický průzkum konstrukce
Pasportizace trhlin Zjištění tloušťky krycí vrstvy a její degradace Zjištění obsahu chloridů Určení hloubky karbonatace Odběr vzorků pro destruktivní (laboratorní) zkoušky
3. Laboratorní zkoušky
Petrografie (obsah vzduchu, rozmístění dutin, nepravidelnosti kameniva, určení vodního součinitele apod.) Chemické rozborů (složení cementu, pH, určení chemických přísad, charakteristiky cementového tmelu a kameniva) Destruktivní zkoušky pro zjištění materiálových charakteristik betonu a oceli (pevnost, modul pružnosti apod.)
4. Rozsah poškození, vyhodnocení
Porovnání skutečných a návrhových materiálových charakteristik, Nasákavost a propustnost betonu Tloušťka krycí betonové vrstvy Výskyt trhlin a odpadávání, Hloubka průniku chloridů a karbonatace, Korozní aktivita výztuže (např. měření poločlánkových potenciálů, galvanostatických pulsů) Agresivita prostředí (např. přítomnost chloridů, síranů, vlhkosti apod.)
5. Statické posouzení s ohledem na stávající stav konstrukce
výpočet pro stálé a nahodilé zatížení posouzení pro ostatní typy zatížení (např. zemětřesení, vítr)

3.2.1.1 *Nedestruktivní zkušební metody* – nedestruktivní zkušební metody jsou používány k určení vlastností zatvrdlého betonu a hodnocení stavu betonových konstrukcí. Tabulky 4 a 5 podávají přehled zkoušek k určení materiálových vlastností zatvrdlého betonu ve stávajících konstrukcích a k určení vlastností konstrukce respektive stavu betonu.

3.2.1.2 *Destruktivní zkušební metody* – Tam, kde vizuální a nedestruktivní zkušební metody nemohou kvantifikovat hloubku a druh ohrožení konstrukce, mohou být odebrány vývrty nebo jiné vzorky. Vývrty mohou dále sloužit ke kalibračním účelům pro nedestruktivní metody, provedení chemických rozborů, k vizuální kontrole, k určení intenzity korozního napadení výztuže a k odhalení přítomnosti dutin nebo trhlin.

3.2.1.3 *Složení betonu* – Otázka, zda má beton specifikované složení, může být zodpovězena na základě zkoušek jádrových vývrtnů. Aplikací metody s počítáním bodů může být pomocí zkušebního leštěného vzorku betonu určena pod mikroskopem povaha systému vzduchových pórů (objem a rozložení). Při indikaci typu a relativního množství jemného a hrubého kameniva je možno také zjistit množství cementového tmelu. Ke zjištění původního poměru v/c není možné použít standardní zkušební postup, ale může být stanoven původní objem vody na základě určení objemu kapilárních pórů. Určení složení betonu je obtížné zvláště v případech vylouhování, chemického působení nebo karbonatace.

3.2.2 Ocelová výztuž

Hodnocení výztuže je primárně vztaženo k určení její přítomnosti, velikosti a rozsahu a hodnocení výskytu koroze. Určení materiálových vlastností jako meze kluzu nebo modulu pružnosti je podmíněno odebráním a testováním reprezentativních vzorků. Vhodné zkušební metody pro ověření množství, polohy a stavu výztuže jsou obsaženy v tabulce 5.

3.2.3 Kotvení ocelových prvků v betonu

Příčinou havárií kotvení v betonových konstrukcích bývá buď chybné provedení, cyklické zatěžování nebo rozrušení betonu. Vizuální prohlídkou se zhodnotí celkový stav betonu v blízkosti kotvení a provádí se zběžná kontrola kotvení, při které se zjišťuje, jaký je stav uložení v betonu, zda nejsou trhliny ve svaru nebo v desce, nebo zda nedošlo k deformaci desky. Mechanickými zkouškami lze ověřit, zda kotvení splňuje parametry předepsané v projektu či zda překračuje návrhové hodnoty. Ke kontrole povrchu svarů nebo jiných kovových složek můžeme použít magnetickou nebo kapilární metodu zjišťování vad, pro kontrolu v celém objemu jsou k dispozici zkoušky prozařováním, ultrazvukové a zkoušky vířivými proudy.

Tab. 4 – Zkušební metody pro určení materiálových charakteristik zatvrdlého betonu na stávajících konstrukcích

Č.	Vlastnost	Použitelná metoda		Komentář
		základní	druhotná	
4.1	Pevnost v tlaku ČSN 73 1317, ČSN ISO 4012 ČSN EN 12504-1	Jádrové vývrtky	Vytrhávací metoda	Pevnost zatvrdlého betonu, porovnání pevnosti v různých místech, vytrhávací metoda není normována
4.2	Nezaručená pevnost v tlaku ČSN 73 1370, ČSN 73 1373	Tvrdoměr Schmidt	...	Tvrdoměr – ovlivněno povrchovými vlastnostmi betonu, Ultrazvuk – průměrná hodnota pro celou. tloušťku průřezu
4.3	Pevnost v tahu ČSN EN 12390-5,6	Zkoušky příčným tahem	Měření tah. pevnosti na konstrukci	Odhad pevnosti v tahu betonu
4.4	Hutnost ČSN EN 12390-7	Objemová hmotnost vzorků	Radiační metoda	...
4.5	Vlhkost ČSN 731375	Vlhkoměry	Radiační metoda	...
4.6	Statický modul pružnosti ČSN ISO 6784	Měření na vývrtkách
4.7	Dynamický modul pružnosti ČSN 73 1372	Rezonanční metoda na odebraných vzorcích	Ultrazvuk	Vyžaduje znalost hutnosti, a Poissonova čísla, dynamický modul je vždy větší než statický
4.8	Smršťování/ roztažnost	Změna délky odebraných vzorků	...	Měření přírůstku změny délky
4.9	Odolnost proti působení vody a CHRL TKP 18	Metoda A	Metoda C	Určení relativní schopnosti betonu ke kontaminaci chloridovými ionty, odhad vlivu chemického utěsnění, membrána povlaků
4.10	Další laboratorní měření *	Petrografické zkoušení vzorků odebraných z konstrukce	Petrografické zkoušky kameniva	Pomoc při určení důvodů porušení, stupně porušení, kvality betonu zabudovaného do konstrukce
4.11	Alkalická reakce	Provozní zkouška při určení alkalické reakce
4.12	Karbonatace, pH TP 121	Fenolftalein (indikátor), pH metr	Další indikátory pH (např. lakmusový papír)	Odhad ochrany výztuže proti korozi v závislosti na hloubce, hloubka karbonatace
4.13	Stanovení mrazuvzdornosti ČSN 73 1322	Petrografie	Petrografie	
4.14	Obsah volných chloridových iontů TP 121	Roztok v kyselině, vodný roztok	Spec. iontová sonda	Náchylnost výztuže ke korozi při proniknutí chloridů
4.15	Vzduchová propustnost ČSN 73 1315	Metoda povrchového prostupu vzduchu		Provozní zkouška propustnosti povrchové vrstvy betonu (15mm)
4.16	Elektrický odpor betonu	Střídavý odpor měř. při použití čtyř sond		Metoda měření střídavého odporu je vhodná k určení efektivnosti použitých přísad
4.17	Poškození ohněm	Petrografie a tvrdoměr	Ultrazvuk, impact – echo, dynamická odezva	Tvrdoměrem lze určit rozsah poškození

*) obsah vzduchu, obsah cementu, vlastnosti kameniva, (určení alkalické reakce, odolnost proti mrazu).

Tab. 5 – Zkušební metody k určení vlastností konstrukce a odhadu stavu betonu [10]

Č.	Vlastnost	Použitelná metoda		Komentář
		základní	druhotná	
5.1	Poloha výztuže	Elektromagnetická	Rentgen a gamagrafie	Utčení polohy a rozdělení výztuže, určení tloušťky krycí betonové vrstvy
5.2	Určení tloušťky betonových prvků	Impakt-echo (I-E), radar	Hloubkové sondy...	Ověření tlouštěk betonu, zajištění větší jistoty při statickém výpočtu, I-E vyžaduje znalost rychlosti vln a GPR dielektrickou konstantu
5.3	Oslabení profilu výztuže	Ultrazvuková sonda k měření tloušťky (vyžaduje přímý dotek s výztuží)	Hloubkové sondy, radiografie	Sledování a měření korozních zplodin a oslabení profilu výztuže nebo předpjaté výztuže, potvrzení polohy a míry degradace, zajištění větší jistoty ve statickém výpočtu
5.4	Lokální a celková stabilita a chování ČSN 73 6209	Zatěžovací zkouška, měření průhybu nebo přírůstku napětí	Měření zrychlení, napětí a posunu	Ověření použitelnosti bez opravy nebo zesílení, stanovení správné zatížitelnosti...
5.5	Korozní potenciály TP 121	Poločlánková metoda měření potenciálů	-	Určení míst s aktivně korodující výztuží
5.6	Korozní rychlost	Metoda lineární polarizace	-	Korozní rychlost zabudované výztuže vyvolaná podmínkami prostředí
5.7	Lokalizace odlomenin, dutin a jiných skrytých defektů	Impakt – echo, infračervená termografie, dynamická odezva, radiografie, GPR	Oklepávání, pilse-echo, SASW, odvtřání a endoskop	Odhad oslabení, určení a lokalizace vnitřních poruch a defektů. Oklepávání je pouze pro povrchové odlamování

3.3 Posouzení stavu konstrukce a životnosti

3.3.1 Hodnocení konstrukce

Na základě posouzení stavu objektu se stanoví rozhodující konstrukční prvky. Pro zjištění současného stavu nebo vytvoření podkladů pro plánování budoucích provozních charakteristik či životnosti, případně pro oba tyto důvody, může být nutné provést další posouzení konstrukce. Při tomto hodnocení je důležité všít si nepravidelností nebo nejednotností ve vlastnostech materiálů, v projektu nebo ve stavebních postupech či v postupech údržby a vlivu faktorů okolního prostředí. I když posouzení konstrukce zahrnuje více, než pouhé vyhodnocení její únosnosti, je statické posouzení konstrukce prvním krokem při celkovém hodnocení objektu. Požadavky na provozní charakteristiky jiné, než je únosnost stavby, se pak řeší pomocí doplňkových zkoušek, jimiž se zjišťují charakteristiky jako např. pro stanovení parametrů pro opravu konstrukce.

Pro hodnocení únosnosti stávajících objektů je nutné stanovit jaká zatížení jsou jednotlivé části konstrukce schopny bezpečně a v provozuschopném stavu unést. Přitom je nutné se zaměřit především na následující:

- existují známky možného statického narušení (například nadměrný počet trhlin nebo deformace konstrukce);
- objekt nebo jeho část prodělala celkové nebo částečné poškození (například vlivem prostředí havárie);
- vyskytují se pochybnosti ohledně únosnosti konstrukce;
- u některých částí objektu existuje podezření na nedostatky v projektu, v použitých dílcích nebo materiálech, nebo na chyby při výstavbě.

Metody hodnocení únosnosti existujících betonových konstrukcí zahrnují buď analytické hodnocení nebo zatěžovací zkoušku. Analytické hodnocení se doporučuje použít tehdy, jestliže máme k dispozici dostatek podkladových informací (například průřezové charakteristiky a údaje o vlastnostech materiálů a o kvalitě stavby), statická zatěžovací zkouška by byla nepraktická vzhledem ke složitosti této zkoušky nebo velikosti požadovaného zatížení, náhlé poškození v průběhu statické zatěžovací zkoušky by mohlo ohrozit celistvost prvku nebo celé konstrukce a následně i zbytkovou životnost objektu.

K získání potřebných informací může být nutné provést některé doplňující zkoušky, jak byly popsány v předchozím textu těchto TP. U tohoto hodnocení se doporučuje provádět teoretické výpočty podle zásad návrhu pevnosti, přičemž konstrukce se považuje za vyhovující, jestliže její únosnost, deformace a ostatní kritéria provozní spolehlivosti vyhovují požadavkům příslušných předpisů.

Statické a dynamické zatěžovací zkoušky se provádějí podle ČSN 73 62 09.

3.3.2 Posouzení životnosti

Každá vhodná návrhová metoda hodnocení životnosti zahrnuje vždy řadu základních prvků: model chování, přejímací kritéria se stanovením vyhovujících provozních charakteristik, zatížení, za nichž mají být tato kritéria splněna, relevantní charakteristické vlastnosti materiálů a faktory nebo míry bezpečnosti, uvažující všechny neurčitosti celého systému. Výběr materiálů a mísicích poměrů, jako maximální poměr v/c , a podrobné posouzení konstrukce představují jeden přístup, používaný pro návrh konstrukcí trvalého charakteru. Další přístup zahrnuje předpověď životnosti za pomoci výpočtů, vycházejících ze znalostí současného rozsahu poškození, mechanismů degradace a rychlosti reakcí na degradaci.

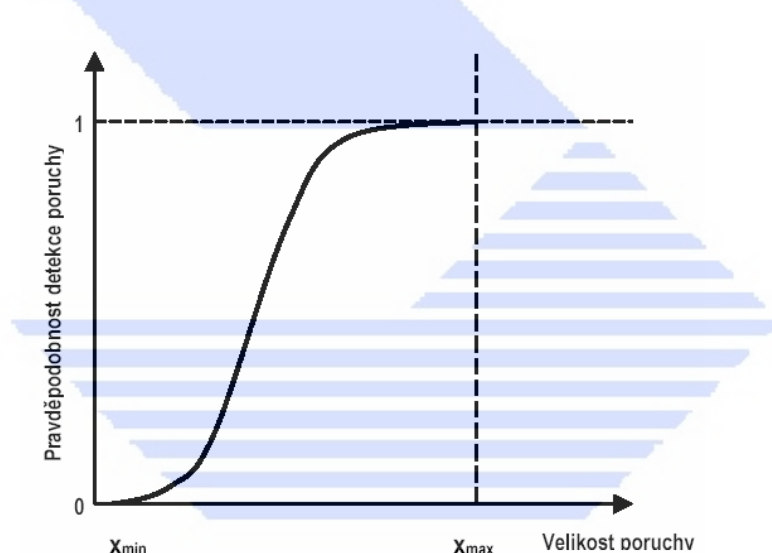
Při stanovení životnosti se respektuje doporučení vyplývající z prohlídek a diagnostických průzkumů. Pro každou sledovanou konstrukci je stanoven typ převládajícího degradačního procesu a z toho vyplývající postupy pro stanovení životnosti (Příloha A).

3.4 Prohlídky a údržba

Prohlídky a údržba jsou běžnou součástí kontroly procesu stárnutí a degradace u mnoha technických objektů. U stavebních objektů jako jsou mosty, které jsou vystaveny extrémním klimatickým podmínkám, se pravidelně posuzuje neporušenost konstrukce. Při těchto prohlídkách se zaznamenávají provozní charakteristiky a odhadují schopnosti konstrukce nadále plnit funkční a provozní požadavky. Strategie prohlídek, diagnostických průzkumů a údržby může být využita také k stanovení spolehlivosti a životnosti konstrukcí.

3.5. Metody stanovování spolehlivosti konstrukce založené na pravděpodobnostním principu

Jeden z přístupů ke stanovení předpokládané spolehlivosti konstrukce nebo její životnosti za budoucích provozních podmínek vychází z metod založených na pravděpodobnosti a zahrnujících časově závislé analýzy spolehlivosti. Tyto metody integrují informace o návrhových požadavcích, o materiálech a degradaci konstrukce, o kumulaci poškození, faktorech prostředí a o nedestruktivních způsobech hodnocení do rozhodovacího procesu, který může poskytnout informaci o kvantitativní míře spolehlivosti konstrukce. Metoda může také zkoumat úlohu strategií hlavních a mimořádných prohlídek a údržby při zvyšování spolehlivosti a prodlužování životnosti. Metody prohlídek a diagnostických průzkumů mohou mít vliv na hodnocení spolehlivosti konstrukce ve dvou oblastech, při zjišťování vad a při modifikaci rozložení četností odolnosti. Některé z nedestruktivních metod zkoušení, které zjišťují přítomnost vady v konstrukci, jsou kvalitativní - nemohou poskytnout kvantitativní údaje o velikosti vady, o její přesné lokalizaci a ostatní charakteristiky, jež by byly potřebné pro stanovení dopadu vady na provozní charakteristiky konstrukce. Žádná z těchto metod nemůže detekovat danou vadu s jistotou. Nepřesnost těchto metod lze vyjádřit statisticky. Tato nahodilost ovlivňuje vypočítanou spolehlivost komponentu.



Obr. 3

Pravděpodobnost detekce poruchy v závislosti na její velikosti

Obrázek č. 3 ukazuje pravděpodobnost zjištění vady $d(x)$ o velikosti x . Takový statistický vztah existuje pro každý z aplikovatelných způsobů prohlídky [11]. Prohlídky také poskytují informace, na jejichž základě lze provést revizi pravděpodobnostních pevnostních modelů, použitých v analýzách spolehlivosti. Účinek prohlídky na rozložení pevnosti ukazuje obr. č. 5. Obrázek zachycuje rozložení četností pevnosti, založené na předchozí znalosti materiálů použitých ke zhotovení konstrukce, znalosti stavby a znalosti standardních způsobů analýzy. Plánovaná údržba a oprava mohou způsobit, že dojde ke změně charakteristik pevnosti. Účinek kontroly prostřednictvím prohlídky a údržby je ilustrován (podmíněnou) hustotou rozložení pravděpodobnosti $f_R(r|B)$, kde B je závislé na

tom, co bylo zjištěno prohlídkou. Prohlídka pravděpodobně způsobí, že střední hodnota rozložení odolnosti se zvýší.

Pro určení vhodné úpravy četnosti rozložení $f_R(r)$ a pro optimální využití prohlídek v analýze spolehlivosti se vyžadují kvantitativní údaje o možnostech metod užívaných při prohlídkách a diagnostických průzkumech.

Jestliže bylo zjištěno, že komponent je pod vlivem faktorů prostředí, jež vedly k jeho poškození, mohou být účinky těchto faktorů vztaženy k hodnocení stavu nebo k hodnocení spolehlivosti konstrukce. Konstruktivní zatížení, technické vlastnosti materiálů a mechanismy degradace pevnosti jsou nahodilé. Odolnost $R(t)$ konstrukce a aplikovaná zatížení $S(t)$ jsou stochastické funkce času. V každém čase t je míra bezpečnosti $M(t)$

$$M(t) = R(t) - S(t) \quad (1)$$

Za obvyklého předpokladu, že R a S jsou statisticky nezávislé nahodilé proměnné, je pravděpodobnost poruchy $P_f(t)$

$$P_f(t) = P[M(t) < 0] = \int_0^\infty F_R(x) f_S(x) dx \quad (2)$$

kde $F_R(x)$ a $f_S(x)$ jsou funkce rozdělení pravděpodobnosti R a funkce hustoty rozložení pravděpodobnosti S . Rovnice (2) poskytuje jedno kvantitativní měřítko spolehlivosti a funkčnosti konstrukce, za předpokladu, že P_f lze odhadnout a validovat.

Pro stanovení životnosti a hodnocení spolehlivosti je pravděpodobnost bezporuchového provozu po určité časové období $(0, r)$ důležitější, než spolehlivost konstrukce v určitý čas podle rovnice (2). Pravděpodobnost, že konstrukce po časový interval $(0, r)$ vydrží, je definována funkcí spolehlivosti $L(0, r)$. Jestliže v časech t_1, t_2, \dots, t_n během období $(0, r)$ působí n diskrétních zatížení S_1, S_2, \dots, S_n , funkce pravděpodobnosti je

$$L(0, t) = P[R(t_1) > S_1, \dots, R(t_n) > S_n] \quad (3)$$

Je-li proces zatěžování spíše plynulý než přerušovaný (diskrétní), je toto vyjádření složitější.

Podmíněná pravděpodobnost poruchy v časovém intervalu $(t, t + \Delta t)$ za předpokladu, že komponent vydržel během období $(0, r)$, je definována funkcí nahodilé poruchy

$$h(t) = -d(\ln L(0, t))/dt \quad (4)$$

Tato funkce je zejména užitečná pro analýzu poruch konstrukce vlivem stárnutí nebo poškození. Například pravděpodobnost, že doba do poruchy konstrukce T_A nastane před budoucím úkonem údržby v čase $t + \Delta t$, za předpokladu, že konstrukce vydrží do doby t , může být vyhodnocena jako

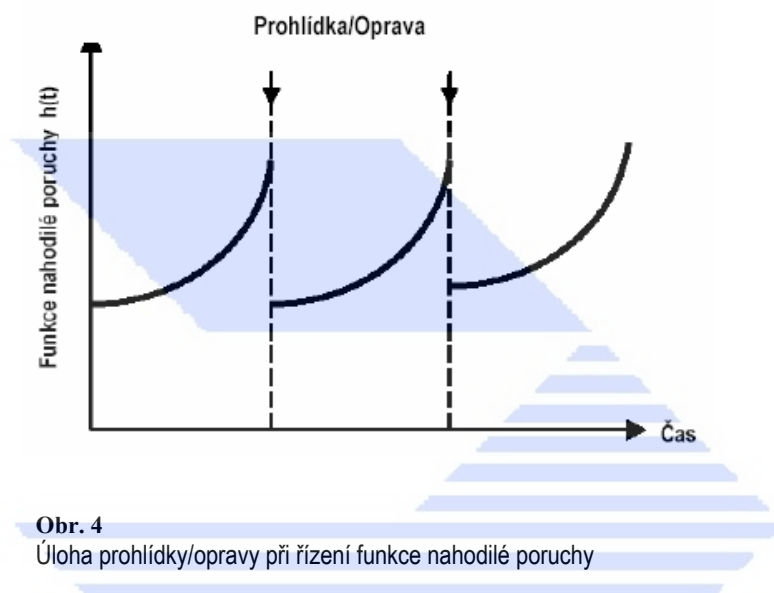
$$P[T_f \leq t + \Delta t | T_f > t] = 1 - \exp[-\int_t^{t+\Delta t} h(x) dx] \quad (5)$$

Funkce nahodilé poruchy pro čistě náhodnou závalu je konstantní. Jestliže se projevuje stárnutí konstrukce a pevnost se zhoršuje, $h(t)$ příznacně roste s časem, jak je zřejmé z obr. 4.

Intervaly prohlídek a údržby, které se požadují jako podmínka pro zachování provozuschopnosti konstrukce, mohou také být určeny z časově závislé analýzy spolehlivosti. Aktualizovaná hustota R po každé kontrole je

$$f_R(r|B) = P[r < R \leq r + dr, B] / P[B] = cKf_R(r) \quad (6)$$

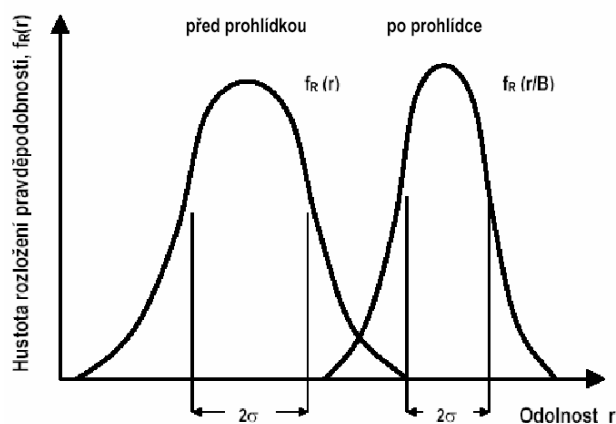
kde $K(r)$ je funkce pravděpodobnosti a c je normalizační konstanta.



Obr. 4

Úloha prohlídky/opravy při řízení funkce nahodilé poruchy

Časově závislá analýza spolehlivosti se pak spustí znovu, přičemž se místo $f_R(r)$ použije aktualizovaná $f_R(r|B)$. Touto aktualizací se pak z funkce nahodilé poruchy stane funkce diskontinuítní v čase a pravděpodobnost poruchy v rovnici (5) se sníží. Účinek prohlídky nebo opravy na funkci nahodilé poruchy ukazuje také obr. 4.



Obr. 5

Vliv prohlídky na rozložení pevnosti

Nejistoty ve způsobech provádění prohlídky nebo opravy mají vliv na hustotu rozložení pravděpodobnosti $f_R(r|B)$. Kombinace metod je z hlediska spolehlivosti obvykle účinnější, než použití jediné metody. Jsou-li k dispozici jen omezené zdroje, je neúčinnější zvolit několik prvků kritických z hlediska bezpečnosti a soustředit se na ně [12,13]. Interval prohlídek a oprav, optimální pro zachování požadované úrovně spolehlivosti, může být stanoven na základě předpokládaných nákladů na cyklus životnosti.

Další příspěvek týkající se pravděpodobnostních principů je uveden v příloze B těchto TP.

4 METODY STANOVENÍ ŽIVOTNOSTI BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ

4.1 Úvod

Metody stanovení životnosti betonové konstrukce se soustřeďují především na proces degradace materiálů. K degradaci dochází působením jednoho a/nebo více degradačních procesů (např. působením agresivního prostředí společně se zatížením). Tento společný účinek ztěžuje rozhodování o životnosti konstrukce jak u nových betonových konstrukcí, kde faktory prostředí a zatížení nemusí být dobře definovány, tak u již existujících konstrukcí, kde je obtížné posoudit podíl jednotlivých vlivů na degradaci. O společném účinku více faktorů je všeobecně málo informací. K primárním faktorům, jež mohou limitovat životnost betonových konstrukcí, patří přítomnost chloridů, oxidu uhličitého (popř. dalších agresivních látek jako jsou kyseliny a sírany), střídavé působení mrazu na konstrukci a mechanické namáhání včetně únavy, vibrace a lokálního přetížení.

4.2 Stanovení životnosti nových konstrukcí

4.2.1 Způsoby stanovení životnosti

Životnost (zbytková životnost) konstrukce se stanoví:

- a) na základě znalosti životnosti podobné konstrukce (s podobnými vlastnostmi), umístěné v podobných podmínkách;
- b) na základě urychlených zkoušek;
- c) pomocí matematických modelů;
- d) stochastickou metodou.

4.2.2 Stanovení založená na znalosti doby životnosti konstrukcí s podobnými vlastnostmi

Tento přístup předpokládá, že trvanlivost konstrukcí vystavených podobnému prostředí je stejná. Každá betonová konstrukce je však jedinečná

z důvodu velké variability v materiálech, geometrii, stavebních postupech, v zatížení a v působícím prostředí.

Betonové konstrukce nejsou nikdy identické vlivem:

- použití různých materiálů (např. dnešní portlandské cementy mají jiné vlastnosti než z doby před 40 lety). Použití chemikálií a dalších přísad a příměsí vedlo k vývoji a použití betonu se zlepšenými vlastnostmi a trvanlivostí
- podmínek okolního prostředí, které nejsou vždy stejné. Další problémem je rozdíl v mikroklimatu (tj. v prostředí u povrchu betonu) a jeho změnách v průběhu času, což se může projevit nepředvídanými účinky na životnost.

Porovnávání životnosti starých a nových konstrukcí (resp. starých a nových materiálů) není vždy zcela jednoznačné a bude to vždy odhad a to dokonce i tehdy, jsou – li v podobných podmínkách. Kromě toho budou odhady životnosti závislé na subjektivním hodnocení působících vlivů a hodnocením odolnosti konstrukce proti těmto vlivům.

Aby se pokud možno odstranilo subjektivní hodnocení, je třeba pro tuto porovnávací metodu vytvořit pomůcku (tabulku nebo grafy) na základě databáze, získané z dlouhodobého sledování konstrukcí. Tato databáze zatím není k dispozici.

Zkušenosti nebo kvalitativní hodnocení nemohou tvořit zcela spolehlivý základ stanovení životnosti – v těchto případech jde spíše o odhad.

Tento způsob stanovení životnosti lze použít u méně významných konstrukcí.

4.2.3. Stanovení životnosti pomocí urychlených zkoušek

4.2.3.1 Základní principy

Tyto metody využívají výsledků zkoušek prováděných při zatížení konstrukce v kombinaci s různým agresivním prostředím s vyšší koncentrací agresivních látek, za vyšší teploty, vlhkosti, atd. Aby bylo možno využít výsledků urychlených zkoušek, předpokládá se, že mechanismy degradace materiálu při urychlených zkouškách jsou stejné jako v reálném prostředí. Jestliže je tato podmínka splněna, může být stanoven tzv. faktor urychlení, který je dán rovnicí :

$$K = R_{AT} / R_{LT} \quad (7)$$

kde R_{AT} je míra degradace při urychleném testu a R_{LT} je míra degradace za normálních podmínek (dlouhodobých zkoušek).

Je-li vztah mezi oběma faktory R_{AT} a R_{LT} nelineární, je vhodné použít metody matematického modelování degradačního procesu.

. Postup při těchto zkouškách je možné rozdělit do čtyř etap :

- definice problému,
- předběžné zkoušky,
- urychlené zkoušky
- interpretace naměřených výsledků.

Problémem při stanovení životnosti betonu pomocí urychlených zkoušek je nedostatek dat z dlouhodobých zkoušek, která jsou zapotřebí k výpočtu R_{LT} z rovnice (7).

4.2.3.2 Aplikace

V následující části je uveden příklad aplikace metody stanovení zbytkové životnosti pomocí urychlených zkoušek. V této aplikaci je doba životnosti

konstrukce t_i dána dobou životnosti vzorku t^* , který je podroben urychleným zkouškám pomocí vztahu :

$$t_i = kt^* \quad (8)$$

kde k je konstanta získaná při zkouškách. Tento postup je využíván při teplotních zkouškách betonu, ve kterých je zkoumaný beton cyklicky zmrazován a následně rozmrazován. Při tomto typu zkoušek je odolnost betonu určena počtem cyklů zmrazování a rozmrazování, který je zapotřebí k dosažení určitého stupně poškození vzorku. Předpokládá-li se, že počet teplotních cyklů, kterým je daná konstrukce vystavena během roku, je konstantní, pak dobu životnosti konstrukce je možno určit ze vztahu :

$$t_i = k_c N \quad (9)$$

kde k_c je koeficient odpovídající podmínkám prostředí a N je počet cyklů zmrazení a rozmrazení, při kterém je dosaženo zničení laboratorního vzorku.

Tento typ zkoušek se používá především k stanovení životnosti betonových konstrukcí, které jsou vystaveny teplotním cyklům zmrazování a rozmrazování a zároveň působení prostředí s obsahem solí. V tomto případě je doba životnosti dána vztahem :

$$t_i = k_f P \quad (10)$$

kde P je koeficient odolnosti zmrazování-rozmrazování a který byl získán prostřednictvím tzv. DBV testů.* Hodnoty faktoru prostředí k_f jsou založeny na sledování v provozních podmínkách, při kterých byl zkoumán vztah mezi stupněm poškození konstrukce, stáří konstrukce a koeficientu odolnosti zmrazování-rozmrazování.

4.2.4 Metody stanovení životnosti pomocí matematických modelů

Pro stanovení doby životnosti pomocí matematického modelování byly vytvořeny modely popisující různé procesy, např. procesy probíhající při korozi, účinku síranů, louhování a cyklickém zatěžování zmrazení-rozmrazení [14].

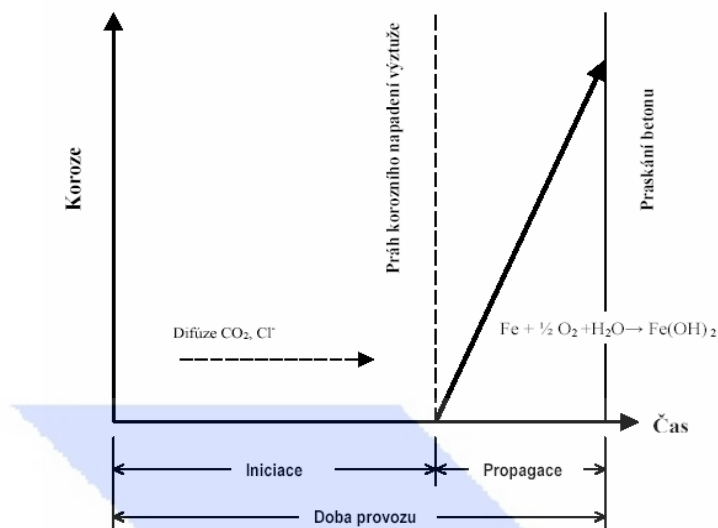
Většina procesů degradace betonu, vyjma procesů při mechanickém zatížení, je spojena s pronikáním vody, solí nebo plynů do betonu. Tyto matematické modely používají k stanovení doby životnosti míry průniku agresivní látky do betonu a míry chemických a fyzikálních reakcí. Tyto matematické modely byly vytvořeny pro popis průniku vody, solí a plynů do betonů pomocí procesů konvekce a difúze [15]. Většina matematických modelů používá k stanovení doby životnosti koeficienty, které popisují transportní procesy, např. koeficient difúze chloridových iontů při korozních procesech.

4.2.4.1 Matematický model popisující postup chloridů

Většina matematických modelů využívaných pro stanovení doby životnosti betonových konstrukcí s ocelovými výztužemi je založena na metodách, které byly vytvořeny pro stanovení životnosti ocelové výztuže [16]. Tento model (tzv. Tuutiho model) vychází z posloupnosti korozního procesu, kdy proces aktivní koroze začíná na konci iniciačního stadia (viz obr. 6). Proces koroze je iniciován difúzí chloridových iontů v betonu do hloubky, ve které jsou ocelové výztuže, nebo karbonatů, která snižuje pH betonu při jeho styku s ocelovou výztuží, nebo též kombinací obou těchto procesů. Další transportní procesy nejsou v tomto modelu uvažovány.

* Deutscher Beton Verein (DBV) testy s rozmrazovacími solemi (E. Vesikari: Nordic Concrete Research, Publication No 5, Norske Betongforening, Oslo, Norway, pp 215-228, 1986)

Důležitým transportním procesem při korozi výztuží může být sorpce, jejíž závislost na čase je $t^{1/2}$. Praskání betonu může zvýšit difúzní koeficient a sorpci betonu, což má za následek urychlení korozního procesu.



Obr. 6
Schematické znázornění iniciační a propagační fáze korozního procesu výztuže

V následujícím textu bude při iniciační fázi korozního procesu uvažován pouze vliv chloridových iontů. Délka iniciačního stadia je ovlivněna převážně mírou difúze chloridových iontů do betonu a prahovou hodnotou koncentrace těchto iontů. Jednorozměrný proces difúze můžeme popsat druhým Fickovým zákonem [17]:

$$\frac{\partial c_f}{\partial t} = \frac{D \partial^2 c_f}{\partial x^2} \quad (11)$$

kde D je difúzní koeficient, x je vzdálenost ocelových výztuží od povrchu betonu a t je čas.

Protože chloridové ionty reagují s trikalciualuminátem, který je obsažen v portlandském cementu, má koncentrace dvě složky - koncentraci vázaných chloridových iontů (c_b) a koncentraci volných iontů (c_f). Vztah mezi c_b a c_f je dán rovnicí :

$$c_b = R \cdot c_f \quad (12)$$

kde R je konstanta.

Jelikož k uvolnění vázaných chloridových iontů může dojít buď pouze při karbonataci nebo působením síranových iontů, je hodnota koeficientu R obvykle rovna 0.

V souladu s Tuutiho modelem je rychlost koroze ve stadiu propagace dána rychlostí difúze kyslíku ovlivňujícího katodový děj, odporem pórového roztoku a teplotou. Délka iniciačního stadia je obvykle mnohem větší než délka stadia propagace koroze. Některé praktické zkušenosti potvrzují, že zjištěná délka iniciačního stadia byla více než pětikrát větší než doba propagace. Odhady

životnosti proto vycházejí z doby iniciace, neboť tvoří nejpodstatnější část celkové doby životnosti [18].

Je-li beton vystaven stálému působení vody, předpovídá Tuuttiho model, že řídicími procesy se díky extrémně nízké rychlosti difúze kyslíku ve vodě stávají korozní procesy probíhající ve stadiu propagace.

Koncepce Tuuttiho modelu byla použita k odhadu vlivu koeficientu difúze chloridových iontů a tloušťky krycí vrstvy betonu na délku iniciačního stadia. Doba iniciace koroze ocelových výztuží je dána následně: C_0 je koncentrace chloridových iontů na povrchu betonu a C_i je koncentrace v hloubce výztuží, jejíž hodnota je na počátku rovna 0. Konec iniciačního stadia koroze je dán časem, ve kterém koncentrace C_i dosáhne hodnoty C_{cr} , což je prahová hodnota koncentrace způsobující iniciaci koroze ocelových výztuží. Obecné řešení rovnice (11) pro beton s výztuží vystavený prostředí s konstantními podmínkami je :

$$\frac{C}{C_0}(Z,t) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left[\operatorname{erfc} \left\{ \frac{(2n+1)-y}{2\sqrt{r}} \right\} + \operatorname{erfc} \left\{ \frac{(2n+1)+y}{2\sqrt{r}} \right\} \right] \quad (13)$$

kde:

erfc je doplněk chybové funkce [19], $y=(L-x)/L$, $r=Dt/L^2$, t je čas, n je obecné řešení, součet všech možných případů; D je difúzní koeficient; x je výška efektivní krycí vrstvy betonu (resp. výška neporušené vrstvy bez trhlin) a L je tloušťka betonu.

Hodnoty příspěvků v součtu pro $n > 0$ jsou malé a je proto možno je zanedbat, což vede ke zjednodušení rovnice (13) na vztah :

$$\frac{C}{C_0} = \operatorname{erfc} \frac{1-y}{2\sqrt{r}} \quad (14)$$

kde $1-y=x/L$. Model byl řešen pro případ, kdy hodnota prahové koncentrace chloridových iontů C_{cr} byla 0,4% (vztaheno k hmotnosti cementu), C_0 byla 0,7% (vztaheno k hmotnosti cementu), $x=50\text{mm}$, $L=300\text{mm}$ a $C_i=0$ v $t=0$. Výsledky pro různé hodnoty tloušťky krycí vrstvy betonu a koeficienty difúze chloridových iontů jsou uvedeny v tabulce 6.

Tab. č. 6 – Hodnoty difusního koeficientu ve vztahu k době iniciační fáze korozního procesu

Tloušťka krycí vrstvy (mm)	Koeficient difúze chloridových iontů D (m^2/s)		
	5.10^{-11}	5.10^{-12}	5.10^{-13}
Čas (roky)			
25	0,56	5,6	56
50	2,3	23,0	230
75	5,0	50,0	500
100	9,0	90,0	900

Z výsledků v tabulce č. 6 vyplývá, že vliv výšky krycí vrstvy je úměrný x^2 . Např. při nárůstu výšky krycí výztuží z 25 na 100mm se doba životnosti zvýší $(100/25)^2$ -krát. Model též ukazuje, že desetinásobné snížení difúzního koeficientu vede k desetinásobnému zvýšení stanovované doby životnosti. Přestože jsou laboratorní stanovení hodnoty difúzního koeficientu nepřesné pro stanovení životnosti betonu s výztužemi, ukazují relativní vliv důležitých materiálových a návrhových proměnných na dobu životnosti.

Rovnice (11) (tj. 2. Fickův zákon) byla též řešena pro různá prostředí, ve kterých se podmínky mění v čase [20]. V těchto případech se v čase mění i koncentrace chloridových iontů na povrchu betonu (např. při použití chloridových posypových solí). Protože se v tomto případě změní okrajové podmínky, je zapotřebí k popisu procesu hromadění chloridů na povrchu použít jiného vztahu než je rovnice (14). Přestože nelze s jistotou určit, jaká funkce $\Phi(t)$ by měla být použita k popisu hromadění chloridů na povrchu, je možné použít lineární nebo odmocninové závislosti této koncentrace na čase. Jestliže je předpokládána lineární závislost $\Phi(t)=kt$, kde k je konstanta, je řešení rovnice (11) dáno vztahem :

$$C(x,t) = kt \left\{ \left(1 + \frac{x^2}{2Dt} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) - \left(\frac{x}{\sqrt{\pi Dt}} \right) e^{-x^2/4Dt} \right\} \quad (15)$$

kde $\operatorname{erfc}()$ je tzv. doplňková chybová funkce. V případě použití odmocninové závislosti $\Phi(t)=kt^{1/2}$, kde k je konstanta, je řešení dáno vztahem :

$$C(x,t) = k\sqrt{t} \left\{ e^{-x^2/4Dt} - \left(\frac{x\sqrt{\pi}}{2\sqrt{Dt}} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right) \right\} \quad (16)$$

Rovnice (15) a (16) jsou nejvhodnější pro řešení případů, kdy do betonu pronikají chloridy z posypových solí.

4.2.4.2 Model popisující působení síranů

Pro stanovení doby životnosti betonových konstrukcí, na které působí sírany obsažené ve vodě, byl vytvořen mechanický model [21]. Tento model je založen na následujících principech :

- Síranové ionty z okolního prostředí difundují do betonu
- Síranové ionty expanzivně reagují v betonu s hlinítem
- Vlivem expanzivní reakce vznikají trhliny a delaminace povrchu betonu

Praskání a delaminace povrchu betonu má za následek vystavení nových ploch betonové konstrukce okolnímu vodnímu prostředí obsahujícímu síranové ionty, jejichž koncentrace je v tomto prostředí větší, než koncentrace síranových iontů uvnitř betonu vzniklá difúzí. Z modelu vyplývá, že napadení v prostředích obsahujících sírany je řízeno koncentrací síranových iontů a hlinítem, difúzí a reakčními poměry a lomovou energií betonu. Vztahy v tomto modelu jsou vytvořeny pro reakční kinetiku, koncentraci síranu zreagovaného do formy ettringitu, tloušťkou oddrovené vrstvy betonu, doby potřebné k oddrovení betonu a mírou degradace betonu.

Závislost hloubky degradace betonu R je lineárně závislá na čase a je dána vztahem :

$$R = X_{spall} / T_{spall} = (EB^2 c_s C_0 D_i) / [\alpha_0 \tau (1 - \nu)] \quad (17)$$

kde

- X_{spall} - tloušťka reakční zóny způsobující drolení
- T_{spall} - čas, kdy se začíná betonová konstrukce drolit
- E - Youngův modul
- B - lineární napětí způsobené koncentrací síranu zreagovaného v měrném objemu (např. 1 mol síranu reagující v 1 m³)
- c_s - koncentrace síranů v objemu roztoku
- C_0 - koncentrace síranu zreagovaného do formy ettringitu
- D_i - koeficient vnitřní difúze síranových iontů
- α_0 - součinitel drsnosti dráhy lomu
- τ - lomová energie povrchu betonu
- ν - Poissonova konstanta

Vstupní data potřebná k řešení modelu je možné stanovit z laboratorních zkoušek, ale některé parametry nejsou pro určitý typ betonu k dispozici a proto je zapotřebí použít hodnot, které jsou pro daný parametr charakteristické. V příkladu stanovení doby životnosti pomocí výše uvedeného modelu byla míra napadení pro speciální portlandský cement odolný síranům stanovena o 30% nižší než u běžného portlandského cementu. Výsledky výpočtu souhlasí s obecným názorem, že propustnost betonu (která určuje difúzní koeficient síranů) je při napadení síranu mnohem důležitějším parametrem, než je např. chemické složení cementu.

4.2.4.3 Louhování

Pro stanovení míry rozkladu malty z portlandského cementu vystavené tekoucí vodě [22] byl použit model pro rozpouštění sádrovce a anhydritu. Tento model je určen vztahem :

$$\frac{dM}{dt} = 2.6KA(C_s - C)^\theta \quad (18)$$

kde

- M - úbytek množství za čas t z plochy A
- K - experimentálně stanovená konstanta míry rozpouštění (tato konstanta je lineárně závislá na rychlostech proudění v laminárním režimu)
- C_s - rozpouštěcí potenciál vody
- C - koncentrace rozpuštěného materiálu v čase t
- θ - kinetický řád procesu rozpouštění

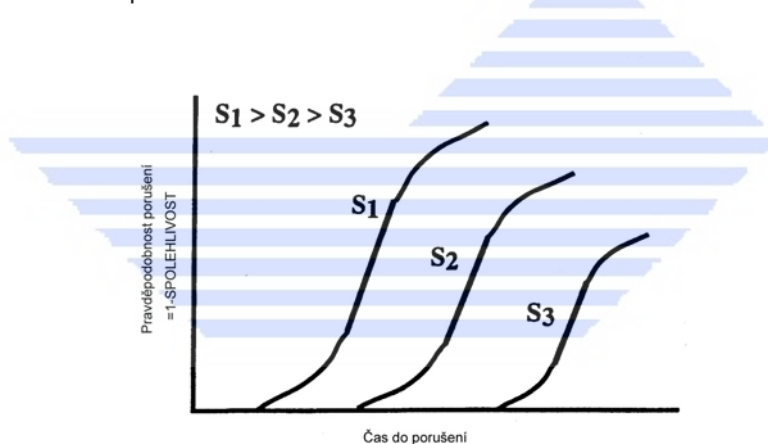
Experimentálně bylo stanoveno, že míra vyplavování křemene a vápníku z malty portlandského cementu má kinetiku druhého řádu. Pomocí modelu byla stanoven úbytek malty 0,8mm/rok při rychlosti proudění 3m/s, což je výsledek srovnatelný s reálným měřením, kdy při stejné rychlosti proudění byl naměřen úbytek 1mm/rok.

4.2.5 Stochastické metody

Stochastické modely pro stanovení doby životnosti konstrukcí jsou založeny na předpokladu, že doba životnosti nemůže být nikdy určena přesně^[23]. Životnost betonové konstrukce ovlivňuje velké množství působících faktorů a jejich vzájemné působení není v současné době příliš známé. Mezi tyto ovlivňující faktory patří zejména složitost přesného dodržení podmínek návrhu konstrukce, určitá variabilita ve vlastnostech vytvrzeného betonu, náhodné vlivy provozního prostředí a vliv mikroklimatu na změnu vlastností materiálů. V současné době existují dva možné způsoby využití stochastických procesů pro stanovení doby životnosti konstrukce: metoda používající modelu spolehlivosti a metoda využívající kombinaci statistických a deterministických modelů.

4.2.5.1 Spolehlivostní metoda

Tato metoda využívá pro stanovení doby životnosti betonové konstrukce kombinace urychlených zkoušek a principů pravděpodobnosti. Tato metoda byla využita při stanovení doby životnosti nátěrů a krycích materiálů^[24]. Tato metoda předpokládá, že dva identické betonové vzorky vystavené působení stejného prostředí mají i stejné rozdělení doby do porušení. Spolehlivostní metoda počítá s pravděpodobnostním rozdělením času do porušení. Při zvyšování napětí, které snižuje dobu do porušení, dostáváme funkci závislosti pravděpodobnosti porušení na čase pro různé hodnoty napětí S - viz. obr.7. Tyto pravděpodobnostní funkce jsou založeny na předpokladu, že pravděpodobnost doby do porušení má průběh Weibullova rozložení. Jestliže se při zvyšování napětí zvyšuje míra poškození, pak se rozdělení pravděpodobnosti doby životnosti v reálných podmínkách zatěžování dá vyjádřit pomocí rozdělení pravděpodobnosti doby do porušení při zvýšené zátěži, které lze získat prostřednictvím laboratorních zkoušek.

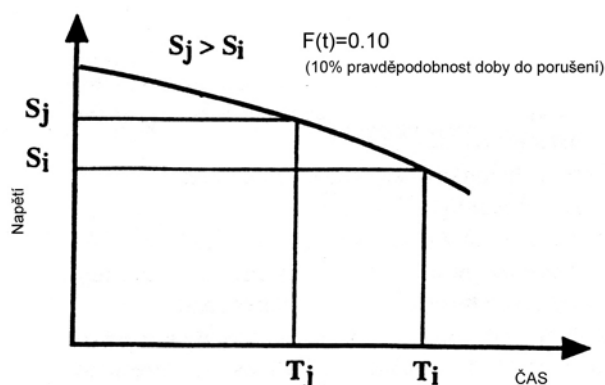


Obr. 7
Pravděpodobnost poruchy při různých hodnotách napětí

Pro vyjádření závislosti lze použít časovou transformační funkci $p_i(t)$, která je dána vztahem:

$$F_i(t) = F_o(p_i(t)) \quad (19)$$

kde t je čas, $F_i(t)$ je rozdělení doby životnosti v i -té hladině zvýšeného napětí a $F_o(t)$ je rozdělení doby životnosti při zatížení v reálném prostředí. Z rovnice (19) lze vyjádřit funkci pravděpodobnosti doby do porušení v závislosti na čase a napětí (tzv. P - S - T diagram), která je znázorněna na obr.8.



Obr. 8 Pravděpodobnost výskytu napětí způsobujícího poruchu v závislosti na čase
(v diagramu je vyznačena křivka pro 10% pravděpodobnost poruchy)

Křivky v P - S - T diagramu, jako je např. křivka $F(t)=0,10$ v obr. č. 8, jsou křivky se stejnou pravděpodobností. Tyto křivky stejné pravděpodobnosti dávají údaj o čase, ve kterém lze očekávat porušení daného procenta vzorků (např. 10%) při daném napětí. Pomocí těchto P - S - T diagramů můžeme provádět stanovení doby životnosti konstrukce v reálných podmínkách. Postup při stanovení doby životnosti s využitím časové transformační funkce můžeme použít pouze za předpokladu, že mechanismus porušení vzorků v laboratorních zkouškách pro všechny hodnoty napětí je stejný jako mechanismus porušení v reálných podmínkách.

4.2.5.2 Kombinace statistických a deterministických modelů

K stanovení doby životnosti betonových konstrukcí se též využívá statistických modelů v kombinaci s modely deterministickými.

Pro výpočet směrodatné odchylky doby životnosti lze použít vztah :

$$\sigma^2(t_l) = \sum_{j=1}^n \left[\frac{\partial t_l}{\partial x_j} \cdot (x_j) \right] \quad (20)$$

kde

- $\sigma(t_l)$ - směrodatná odchylka doby životnosti
- $\sigma(x_j)$ - směrodatná odchylka proměnných x_j , které ovlivňují dobu životnosti
- $\partial t_l / \partial x_j$ - parciální derivace t_l podle x_j
- n - počet proměnných

Parciální derivace $\partial t_l / \partial x_j$ je možno vypočítat ze středních hodnot stochastických proměnných za předpokladu, že proměnné x_j jsou nezávislé.

Rozdělení pravděpodobností doby životnosti má charakter log-normálního rozdělení. Jako příklad využití stochastických metod je následně uveden model karbonatace [25]. Hloubka karbonatace x v betonu je dána Fickovým difúzním zákonem:

$$x^2 = \left(\frac{2D}{a}\right) dp \cdot t \quad (21)$$

kde D je difúzní koeficient, a je koncentrace složek betonu, které karbonatují, dp je rozdíl parciálního tlaku CO_2 , t je čas.

Hloubku karbonatace lze vyjádřit jako stochastický proces vztahem :

$$f(x, x_0, t) = \frac{1}{\sigma(2\pi t^{1/2})^{1/2}} \exp\left\{-\frac{(x - x_0 - \mu t^{1/2})^2}{2\sigma^2 t^{1/2}}\right\} \quad (22)$$

což je hustota normálního rozložení funkce f se střední hodnotou $x_0 + \mu t^{1/2}$ a odchylkou $\sigma t^{1/2}$. Počáteční hodnota x_0 způsobuje rychlejší karbonataci, která probíhá v povrchové vrstvě betonu. Střední hodnota míry karbonatace daná rovnicí (22) je stejná jako v rovnici (21), ale s rozdílnou hloubkou karbonatace, která je dána hustotou normálního rozložení. Tento model byl řešen pro případ, kdy výška krycí vrstvy betonu nad výztuží byla 25mm, beton měl $v/c=0,5$ * a byl karbonatován po dobu 50let. Počáteční hloubka rychlé karbonatace byla stanovena na $x_0=3\text{mm}$. Statistické parametry byly stanoveny z dat získaných při měřeních v reálném prostředí, ve kterých byl určen vzájemný vztah mezi v/c a hloubkou karbonatace v mm/rok^{1/2}. Přibližně 16% změřených dat mělo hodnotu odchylky větší než směrodatná odchylka pro normální rozložení. Dále byla stanovena pravděpodobnost karbonatace v hloubce 25mm po 50letech na $p=2,3 \times 10^{-4}$. Jestliže se hodnota v/c zvýšila na 0,6, zvýšila se tato pravděpodobnost na $3,3 \times 10^{-2}$.

4. 3 Stanovení zbytkové provozní životnosti

Pro stanovení zbytkové životnosti betonu a betonových výztuží je možné použít několika typů metod, které se liší způsobem hodnocení stavu betonu. Prvním typem jsou metody založené na stanovení zbytkové životnosti pomocí zkoušek a to jak prostředí, kterému je betonová konstrukce vystavena za normálních podmínek, tak i v prostředích, které urychluje proces stárnutí betonu a betonových výztuží.

Další metody, pomocí kterých lze určit zbytkovou životnost, využívají stanovení pomocí materiálů, které mají podobné vlastnosti jako použitý beton a jeho kovové výztuže, a u kterých je možno snadno určit dobu jejich životnosti.

Poslední skupinou jsou pak metody založené na matematickém modelování chemických a fyzikálních procesů degradace.

Pro stanovení zbytkové životnosti betonových konstrukcí pomocí všech výše zmíněných metod se dá použít následující postup :

- 1) určení chemických a fyzikálních podmínek, kterým je daná betonová konstrukce vystavena
- 2) zjištění stupně a způsobu degradace betonu a jeho výztuží
- 3) určení stavu, v jakém bude betonová konstrukce ve svém konečném stadiu životnosti

* v/c = poměr voda-cement

- 4) provedení určitého typu extrapolace pro výpočet zbytkové životnosti ze současného stavu betonu a jeho stavu v konečném stadiu životnosti

4.3.1 Poškození vlivem koroze

Ve většině případů je životnost betonových konstrukcí dána kovovými výztužemi v betonové konstrukci, podléhajícími procesu stárnutí v důsledku koroze. Pro stanovení korozního napadení ocelových výztuží jsou nejčastěji využívány dva způsoby. Prvním z nich je modelování korozních procesů probíhajících ve výztužích a druhým je pak vlastní měření stavu korozního napadení.

4.3.1.1 Zjištění stavu korozního napadení pomocí modelování

Tento způsob je založen na difúzním modelu pro stanovení zbytkové životnosti betonových konstrukcí vystavených působení chloridových iontů. Tento model předpokládá určité stadium iniciace koroze a pak následnou difúzi chloridových iontů, která určuje míru korozních procesů probíhajících na výztužích.

Princip určení zbytkové životnosti výztuží pomocí této metody je následující :

- 1) Odebrání vzorků z betonové konstrukce v různých hloubkách od povrchu betonu a stanovení obsahu chloridů.
- 2) Výpočet koeficientů C_0 a D_{cl} podle následujícího vztahu :

$$C(x, t) = C_0 [1 - \operatorname{erf}(x / 2(D_{cl}t)^{1/2})], \quad (23)$$

kde $C(x, t)$ kde koncentrace chloridů v hloubce x a čase t ; C_0 je konstanta určující koncentraci chloridů na povrchu betonu; D_{cl} je koeficient difúze chloridových iontů a $\operatorname{erf}(x)$ je chybová funkce.

Tato chybová funkce je definována jako dvojnásobek integrálu Gaussova rozložení, které má nulovou střední hodnotu a odchylku (varianci) 1/2, tedy je dána následující rovnicí :

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (23a)$$

Po určení koeficientů C_0 a D_{cl} můžeme snadno určit koncentraci chloridových iontů v libovolné hloubce od povrchu v libovolném čase. Pro výpočet zbytkové životnosti se používá prahová koncentrace chloridových iontů, a která byla stanovena na 0,4% obsahu těchto iontů v celkovém objemu cementu. Zbytková životnost ocelových výztuží je pak dána jako čas, který je zapotřebí k dosažení této koncentrace v dané hloubce.

4.3.1.2 Měření stavu korozního napadení

K stanovení zbytkové životnosti ocelových výztuží pomocí této metody se využívá měření korozní proudové hustoty v těchto výztužích, tzv. metoda polarizačního odporu [26].

Tento korozní proud se využívá ke zjištění úbytku oceli v příčném průřezu, resp. k úbytku průměru výztuže. K určení úbytku se používá následujícího vztahu:

$$\Theta(t) = \Theta_i - 0,023 * i_{corr} * t, \quad (24)$$

kde $\Theta(t)$ [v mm] je průměr výztuže v čase t ; Θ_i je původní průměr výztuže [v mm]; i_{corr} je korozní proudová hustota (korozní rychlost) [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]; t je čas od začátku doby propagační fáze korozního procesu [v rocích] a konstanta 0,023 udává převodní faktor z $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ na mm/rok.

Na základě laboratorních zkoušek a zkoušek v reálném prostředí byl stanoven vztah mezi velikostí i_{corr} a zbytkovou životností:

- i_{corr} je menší než $0,5\mu\text{A}/\text{cm}^2$ – neočekává se korozní poškození
- i_{corr} je mezi $0,5$ a $2,7\mu\text{A}/\text{cm}^2$ – doba životnosti se pohybuje mezi 10 až 15 lety
- i_{corr} je mezi $2,7$ a $27\mu\text{A}/\text{cm}^2$ – doba životnosti se pohybuje mezi 2 až 10 lety
- i_{corr} je větší než $27\mu\text{A}/\text{cm}^2$ – porušení konstrukce je možné očekávat do 2 let

Měření korozní rychlosti je ovlivněno mnoha faktory – je proto vhodné jeho výsledky použité ke stanovení životnosti považovat spíše za doplňující údaje a porovnat je s výsledky stanovení životnosti jinými způsoby.

Postup při měření korozní rychlosti metodou lineární polarizace je uveden v příloze C těchto TP.

4.4 Stanovení zbytkové životnosti založené na extrapolacích

Zbytkovou životnost betonových konstrukcí je též možno předpovědět pomocí znalosti podmínek v betonu ve stávajícím čase a v čase, kdy betonová konstrukce dosáhla vysokého stupně degradace a je zapotřebí její výměny nebo opravy. Pak je možné stanovit úroveň degradace v daném čase pomocí extrapolace.

Nejčastěji se pro výpočet používá metoda extrapolace pomocí časové řady. Stupeň degradace betonu je závislý na prostředí, kterému je beton vystaven, geometrickým uspořádáním betonové konstrukce, vlastnostmi použitého betonu, charakteristickými procesy degradace a koncentrací agresivních chemických sloučenin. Použití extrapolace pomocí časového řádu předpokládá, že tyto ovlivňující faktory jsou konstantní, a proto je možné je vyjádřit pomocí koeficientu k_d [27]. Dále je pro výpočet extrapolace zapotřebí určit míru údržby konstrukce jako funkci času t_y . Pak lze pro stanovení stupně degradace A_d použít vztah:

$$A_d = k_d t_y^n, \quad (25)$$

kde A_d je kumulativní degradace v čase t_y a n je časový řád, kdy $n=0$ představuje nulovou degradaci. Lze-li určit dobu inicializačního stadia a jeho délku, pak pravou

stranu rovnice je možno přepsat do tvaru $k_d(t_y - t_0)^n$, kde t_0 je délka iniciačního stadia.

Celkovou míru degradace R_d je možno vyjádřit pomocí vztahu:

$$R_d = nk_d t_y^{n-1} \quad (26)$$

Z této rovnice je zřejmé, že je-li $n < 1$, pak míra degradace má v čase klesající charakter, pro $n = 1$ je tato míra konstantní a pro $n > 1$ pak míra degradace s časem roste.

Pakliže je definováno A_{df} jako stupeň poškození při porušení konstrukce, dá se čas do tohoto porušení t_{yf} vyjádřit pomocí vztahu:

$$t_{yf} = (A_{df} / k_d)^{1/n} \quad (27)$$

Zbytková doba životnosti konstrukce je pak dána jako rozdíl doby, ve které byla prováděna prohlídka, a času t_{yf} .

Hodnota koeficientu n závisí na míře řídicích procesů, které způsobují degradaci betonové konstrukce a může být určena buď pomocí teoretické analýzy a matematického modelování nebo empiricky při použití urychlených zkoušek degradace.

4.5 Souhrn

Metody, které se používají pro stanovení životnosti stavebních materiálů, zahrnují odhady založené na zkušenostech, dedukce vycházející ze známých provozních vlastností podobných materiálů, urychlené zkoušky, aplikaci koncepcí spolehlivosti a stochastických koncepcí a matematické modelování na bázi chemie a fyziky procesů degradace. Často se tyto metody vzájemně kombinují. Nejslibnějšími metodami jsou urychlené zkoušky, aplikace koncepcí spolehlivosti a stochastických koncepcí a matematické modely.

V porovnání se stanovením životnosti nového betonu bylo zatím popsáno jen málo studií, zabývajících se stanovením zbytkovou životnosti betonu u již provozovaných objektů. Většina studií z odborné literatury se zabývá korozí výztuží v betonu a odráží rozsah a závažnost tohoto problému. K nejslibnějším způsobům stanovení zbytkové životnosti betonu patří aplikace matematických modelů na proces degradace. Nemělo by se při tom spoléhat výhradně na empirické modely, ale měly by být zpracovány teoretické modely. K výhodám tohoto přístupu patří větší spolehlivost stanovení životnosti, potřeba menšího počtu údajů a širší použití, například pro širokou škálu podmínek prostředí. Pro získání realističtějších stanovení životnosti by se měly kombinovat deterministické a stochastické modely, neboť čistě stochastické modely mají omezené použití vzhledem k nedostatku adekvátních databází statistických parametrů. Urychlené zkoušky neposkytují přímou metodu pro provádění stanovení životnosti, mohou však být užitečné při získávání údajů jako podkladů pro analytické modely.

5 EKONOMICKÉ HODNOCENÍ

5.1 Úvod

Výstavba nových objektů ve veřejném i v soukromém sektoru, jakož i existující betonové konstrukce a objekty, vyžadují rozhodování, podložené informacemi o ekonomice a životnosti (cyklu životnosti) těchto objektů a konstrukcí. Při rozhodování o životnosti je třeba posoudit, zda jsou vyšší počáteční kapitálové investice do stavby ospravedlnitelné získáním delší životnosti, zda je tyto vyšší investice možno odůvodnit snížením provozních nákladů nebo nákladů na údržbu, zda vyšší roční náklady na kontrolu a údržbu vynahrazují prodloužení životnosti stávajícího objektu, zda by se měly zastaralé objekty nahradit objekty, které vyžadují méně častou a méně nákladnou pravidelnou údržbu či zda by se měl stávající objekt opravit nebo nahradit jiným, a tím snížit denní provozní náklady a náklady na údržbu nebo zvýšit míru bezpečnosti, ..atd.

Životnost a příslušné náklady jsou klíčovými prvky při řešení otázek uváděných výše. Životnost je možno chápat jako účinnou dobu podprogramů, např. pravidelných renovací, ale lze na problematiku pohlížet jako na celek. Výběr technicky proveditelných variant, přinášejících minimální celkové náklady ve stanoveném plánovacím horizontu, tvoří scénář strategie minimálních nákladů za cyklus životnosti při řízení objektů. Základem racionálního řízení objektů a majetku je tedy vliv provozuschopnosti (nebo životnosti) objektu na peněžní tok po dobu tohoto cyklu.

5.2. Metody ekonomické analýzy

5.2.1 Všeobecně

Ekonomická analýza je nástroj racionálního rozhodování v technických situacích, kdy se provádí volba ze skupiny variant, přičemž rozdíly mezi těmito variantami lze vyjádřit finančně. První dva kroky při technicko-ekonomické analýze jsou u všech metod ekonomických analýz stejné. První krok - stanovení všech použitelných, technicky schůdných variant. Jednou z realizovatelných variant může být i nepřijetí žádných opatření. Druhý krok - vykalkulování prvků peněžního toku a určení časových schémat peněžního toku. Při zpracování těchto schémat je třeba stanovit cílovou dobu ekonomické životnosti (plánovací horizont), k němuž se všechny nákladové varianty budou hodnotit. Proto se technicko-ekonomická analýza může použít i pro rozhodování o životnosti betonových konstrukcí.

5.2.2 Metody

Jsou-li stanoveny varianty a jejich peněžní toky, existuje řada různých metod, pomocí nichž lze provést analýzu. Všechny analýzy by měly poskytnout stejné výsledky pokud jde o výběr variant, avšak z povahy scénáře, podle kterého se

* Standardizovaná terminologie stavební ekonomiky je uvedena např. v ASTM E 833.

varianty vyhodnocují, může být použití určitého postupu upřednostněno. Je popsáno následujících pět metod^[28]:

- Náklady na cyklus životnosti (*LCC - Life-cycle cost*) - zjišťuje pro každou variantu ekvivalentní hodnoty relevantního peněžního toku, v přítomné nebo v roční hodnotě, za zvolený plánovací horizont.^[29]
- Poměr přínosů a nákladů (*BCR - Benefit-to-cost ratio*) - zjišťuje pro každou variantu poměr přínosů a nákladových položek, kvantifikovatelných finančně na základě ekvivalentních hodnot, vyjádřených buď v přítomné nebo v roční hodnotě.^[30]
- Vnitřní návratnost (*IRR - Internal rate of returns*) - zjišťuje úrokovou míru, při níž ekvivalentní čistý peněžní tok (vyjádřený v přítomné nebo v roční hodnotě) se rovná nule, pro porovnávací varianty a pro porovnání s přijatelnou diskontní sazbou nebo požadovanou mírou návratnosti.^[31]
- Čisté přínosy (*NB - Net benefits*) - zjišťuje rozdíl mezi přínosem (včetně negativního přínosu) a nákladovými položkami, vyjádřitelnými finančně, na základě ekvivalentních hodnot buď v přítomné nebo v roční hodnotě.^[32]
- Období splacení (*PB - Pay-back*) - vypočítává období, za které se investiční náklady a výdaje zaplatí z příjmu nebo úsporami nákladů, na základě ekvivalentních hodnot vyjádřených v současné nebo v roční hodnotě pro zvolenou diskontní sazbu.^[33]

Popsané metodiky mohou být rovnocenně použity nejen pro velké investiční celky, ale i pro specifické části, například betonové konstrukce. Kromě toho, i když mnohé technické projekty, zejména v případě prací ve veřejném sektoru, zahrnují peněžní toky sestávající většinou nebo zcela z vyplacených částek, jsou metody, které pracují s výnosem (příjmy), jako jsou BCR, IRR, NB a PB, také použitelné. V situacích, kdy přínos nebo příjmové toky nelze kvantifikovat, může být provedena ekonomická analýza nejmenších nákladů. Při porovnávání variant zjistíme rozdíly mezi nákladově porovnatelnými prvky i jaké úspory přináší jedna varianta oproti druhé. Nejjednodušší metoda, která je nejsnáze použitelná pro technicko-ekonomické analýzy, je metoda nákladů na cyklus životnosti (LCC). Při uplatnění těchto postupů na betonové konstrukce je důležité, aby se analýzy jednotlivých variant prováděly na základě běžných nákladů, přičemž by se měly uvažovat pouze náklady, vztahující se k betonovým konstrukcím (nebo by případně měly být přiřazeny odpovídající náklady z nákladů na objekt). Podobně je zásadně důležité, aby se aspekty výhodnosti opravy měřily správně přírůstkem životnosti.

5.2.3 Nejistota a riziko

5.2.3.1 Přístup k řešení

Technicko-ekonomické analýzy se týkají budoucnosti, a proto je v nich přítomen prvek nejistoty a rizika. Níže jsou stručně a obecně diskutovány dva nejčastěji používané přístupy k řešení této otázky, stochastické postupy a analýza citlivosti^[34].

5.2.3.2 Stochastické postupy

V některých případech se budoucí náklady odvozují z výskytu událostí, jež se řídí zákonem pravděpodobnosti. Jako příklad lze uvést náklady na povodňové škody u vodních betonových staveb, které vzniknou, jestliže kulminační průtok je vyšší než projektové hodnoty, a dále ztráty z událostí jako jsou požár, vítr nebo vandalismus. Je-li pravděpodobnost výskytu takové události v průběhu kteréhokoli daného roku známa, nebo může-li být odhadnuta na základě předchozích záznamů, pak

nejpravděpodobnější roční hodnota, příslušející k této události, je výsledkem pravděpodobnosti, a náklady na odstranění následků této události, jestliže nastane, budou následující:

$$A = C.p \quad (28)$$

kde A je průměrná roční hodnota nepříznivých následků události v dlouhodobém měřítku; C jsou náklady na nepříznivou událost, jestliže nastane; p je pravděpodobnost, že nepříznivá událost v daném roce (desetiletí) nastane.

Pravděpodobnost může být v rozsahu od nuly (není šance, že událost nastane) do jedné (jistota, že k události dojde).

5.2.3.3 Analýza citlivosti

Technicko-ekonomická analýza pracuje s peněžními toky, sahajícími od současnosti do budoucnosti. Nejistota vždy existuje ohledně délky životnosti, načasování a částek budoucích příjmů a výdajů. Mohou se objevit také nepředpokládané výdaje nebo příjmy. Analýzou citlivosti se zjišťuje působení variability prvků peněžního toku v ekonomickém rozhodování. Postup, používaný pro provádění analýzy citlivosti, by měl všeobecně obsahovat následující kroky:

- stanovení prvků peněžního toku, u nichž je nejpravděpodobnější, že se budou lišit od plánovaných hodnot;
- odhadnutí pravděpodobného rozsahu odchylky a určení navýšení u vybraných prvků;
- volba metody, kterou použijeme pro vyhodnocení (např. přítomná hodnota, roční hodnota nebo míra návratnosti);
- provedení výpočtů pomocí zvolené metody pro každé navýšení v odhadnutém rozsahu odchylky a pro každý variabilní prvek peněžního toku; a
- grafické zobrazení vypočtených hodnot (ordináta - druhá souřadnice) proti příslušnému navýšení (abscisa - první souřadnice) u každého příslušného prvku.

Diagramy („pavouky“), které z výše uvedeného postupu vzejdou, názorně zobrazí citlivost příslušných prvků. Čím je diagram strmější, tím větší je citlivost (vertikála představuje nekonečnou citlivost, horizontála nulovou citlivost).

5.3 Problémy v souvislosti s ekonomickým hodnocením životnosti betonových konstrukcí

5.3.1 Nový objekt - předpokládaná životnost u předložených variant

Nejčastějším problémem v souvislosti se životností, s nímž se lze setkat při technicko-ekonomických analýzách, je přiřazení životnosti jednotlivým alternativním variantám, kterými může být: ponechat v současném stavu, provést opravy nebo rekonstrukci, nebo nahradit jiným objektem. Je zřejmé, že tato otázka je pro spolehlivost hodnocení životnosti velmi důležitá. Současně je stále obtížnější plánovanou životnost stanovit, protože vzhledem k rychlým změnám technologií chybí historická perspektiva. Za současných podmínek je ukončení životnosti často diktováno nejen poškozením objektu, nýbrž také jeho funkční zastaralostí. Proto je

velmi důležité, aby metodika plánování životnosti byla připravena a důsledně aplikována na všechny uvažované varianty. Dokonce i tehdy, jsou-li absolutní hodnoty případně chybné, mělo by porovnání variant zůstat přiměřeně platné.

Tab. č. 7—Procentuální rozdíly mezi ročními hodnotami prvních nákladů pro nekonečnou a konečnou životnost

Konečná životnost [roky]	Procentuální rozdíl u trvalé životnosti při úrokové sazbě i , [%]			
	5 %	10 %	15 %	25 %
25	-30,0	-9,2	-3,0	-0,4
30	-23,0	-5,7	-1,5	-0,1
40	-14,0	-2,2	-0,4	0,0
50	-8,7	-0,8	-0,1	0,0
80	-2,0	0,0	0,0	0,0
100	-2,0	0,0	0,0	0,0

5.3.2 Analýza výměny

Analýza výměny konstrukce se v zásadě neliší od technicko-ekonomické analýzy v ostatních případech. Jednou z variant však je zachování betonové konstrukce, s jejíž výměnou za jinou se uvažuje (tzv. varianta „obránce“). Další uvažované alternativní varianty („vyzývatele“) představují navržené varianty, jež mají nahradit obránce. K úvahám o výměně konstrukce může vést řada důvodů, včetně:

- neschopnosti stávající konstrukce plnit nadále své funkce bez rozsáhlých oprav nebo úprav;
- neschopnosti stávající konstrukce vyhovět stávajícím nebo předpokládaným budoucím nárokům vzhledem ke změnám požadavků;
- na trhu se objevili vyzývatele, kteří mohou požadované funkce plnit hospodárněji.

Hlavním problémem v souvislosti s životností u analýzy výměny je skutečnost, že u této metody není možné téměř nikdy (v případě obránce) uplatnit koncepci opakovatelnosti, pravidelně používanou v ekonomické analýze variant, za období delší než je životnost varianty. Období analýzy náhrady (obvykle nazývané plánovací horizont) vychází spíše z budoucích požadavků na konstrukci. Je-li toto období delší než předpokládaná zbývající životnost obránce, zahrnuje alternativa s obránce časově odloženého vyzývatele. V takovém případě se musí odhadnout tržní hodnota (zůstatková hodnota) přidaného vyzývatele na konci plánovacího horizontu. Pro zjednodušení a vzhledem k obtížnosti předpovídání budoucích událostí je běžnou praxí limitovat plánovací horizont zbývajících životností obránce. Potom je potřeba pouze odhadnout tržní hodnoty každého vyzývatele na konci plánovacího horizontu.

5.3.3 Práh rentability životnosti

V některých případech se prvky peněžního toku liší s časem natolik, že v určitém okamžiku životnosti betonové konstrukce jsou náklady minimální (nebo zisk maximální, v závislosti na okolnostech). Tato situace obecně nastává v případě konstrukce produkující čisté příjmy, jež klesají jako funkce času.

5.3.4 Trvalá funkčnost (kapitalizované náklady)

Většina betonových a stavebních konstrukcí má velmi dlouhou plánovanou životnost - 50, 100 i více let. K takovým stavbám patří například silnice, mosty, přehrady, důležité budovy, vodovody a stokové sítě. Protože je obtížné předpovídat budoucí vývoj, je v těchto případech často výhodnější při hodnocení uvažovat s nekonečnou životností (trvalou funkčností).

Z tabulky č. 7 vyplývá, že nejsou významné rozdíly mezi trvalou funkčností a časovým obdobím konečné životnosti přibližně 25 let u vysoké úrokové míry (25 %), nebo 100 let v případě nízké úrokové míry (5 %). Také některá aktiva, například pozemek, mají trvalou životnost.

6 VÝVOJOVÉ TRENDY

6.1 Úvod

Provozní životnost nových i stávajících betonových konstrukcí ovlivňují opatření k zamezení degradace od užitého zatížení a vlivem podmínek prostředí, která se přijímají při projektování a při provádění stavby (např. stupeň trvanlivosti). Trvanlivost vnáší do projektování železobetonových konstrukcí prvek času, kterému by měla být věnována stejná pozornost jako pevnosti. V současné době projektování a výstavba zahrnují sedm položek a sice:

- 1) návrhová zatížení a účinky;
- 2) funkční kritéria;
- 3) stupeň bezpečnosti nebo spolehlivosti;
- 4) návrh a rozkreslení detailů;
- 5) specifikace materiálů;
- 6) provedení a stavební postupy; a
- 7) minimální úroveň údržby.

Opatření v souvislosti s trvanlivostí konstrukce se v minulosti soustřeďovala do bodů 5 a 6. Kromě několika málo výjimek nebyla funkční kritéria v této projektové fázi přímo uvažována. Současný přístup k životnosti betonových konstrukcí spočívá v uspokojování specifických požadavků, jako jsou požadavky na maximální v/c a minimální krycí vrstvu betonu pro určité podmínky prostředí nebo určité aplikace.

Předpokladem je, že při splnění těchto podmínek dosáhne konstrukce požadované životnosti, avšak na neurčitou dobu. Budoucí snahou je, aby metodika vzájemného vztahu mezi prostředím, působícím zatížením a stanovením provozní životnosti byla zařazena do nového souboru norem a předpisů.

Do budoucna čím dále více stoupá důležitost další výzkumné práce potřebné k tomu, aby bylo možné provádět stanovení životnosti přesněji. Tyto požadavky zahrnují shromažďování údajů k podpoře stanovení provozní životnosti, dopracování matematických modelů popisujících stárnutí a degradaci konstrukcí, studium účinků mikroklimatu a dlouhodobého chování, syntézu vzájemného působení fyzického namáhání a degradace účinky prostředí, a zapracování kladných vlivů přiměřené kontroly a modernizace konstrukcí do postupů stanovení jejich provozní životnosti.

6.2 Projektování trvanlivosti

Kvantitativní projektování trvanlivosti vyžaduje lepší pochopení mechanismů degradace, podrobnější charakteristiky provozního prostředí a kompletnější údaje o materiálech, vypracování dokonalejších modelů a vypracování norem a předpisů pro používání projektových metod a přijímání stanovení životnosti. Očekává se, že využívání informací o progresivních fyzikálních i chemických změnách betonu k vypracování kritérií pro stanovení provozní životnosti bude intenzivnější. Komparativní přístup naráží na problém jedinečnosti jednotlivých betonových konstrukcí, vyplývající z ohromné rozmanitosti materiálů, geometrie a stavebních postupů včetně změn vlastností betonových materiálů v posledních letech. Hodnotu tohoto porovnávacího postupu zvyšuje zpětná vazba z posuzování životnosti v praxi.

Důležitým aspektem v rozvoji projektování trvanlivosti u betonových konstrukcí je potřeba vybudování databáze potřebných měření funkčních vlastností v provozu a vlivů prostředí. Databáze by zahrnovala aplikace, uvádějící očekávané reakce i variabilitu reakcí za různých podmínek. Informace z databáze by mohly být využity pro vypracování dokonalejších modelů a k ověření modelů stávajících. Nové modely by se použily k vypracování vztahů funkčních charakteristik s časovými vazbami za definovaných podmínek. Normy a předpisy pro přejímku by sloužily ke stanovení požadované minimální úrovně funkčních charakteristik. Kritéria funkčních charakteristik by v nich měla být udána jako pásma hodnot, která berou v úvahu nejistoty.

Cílem této činnosti je vypracovat postup projektování životnosti, který by byl založen na stejných principech, z nichž vychází konstrukční návrh, např. bezpečnost, provozuschopnost, mezní stavy a spolehlivost. Kromě toho se zvažují i celkové náklady za cyklus životnosti a zpracovává se reálný postup pro testování funkčních charakteristik ke stanovení chování materiálu. Určité práce byly vykonány na projektování konstrukcí s vyšší odolností, jako jsou stavby umístěné na volném moři a v pobřežních vodách a vozovky a na shromažďování údajů o funkčních charakteristikách. Dále probíhají práce na vývoji databáze, obsahující informace o účincích stárnutí a vlivu faktorů prostředí na beton a na materiály výztuží. Rovněž se zkoumá vliv provozních kontrol a údržby na zvýšení spolehlivosti a na prodloužení funkční životnosti železobetonových prvků v ohybu a ve smyku. Činnost v této oblasti musí i nadále pokračovat, včetně vypracování nových norem a předpisů ohledně vzájemného vztahu prostředí, aplikovaného zatížení a stanovování provozní životnosti.

7 Z Á V Ě R

Tyto technické podmínky obsahují souhrnné poznatky týkající se obecných postupů při stanovení životnosti a při sběru údajů, kterých se pro stanovení životnosti využívá.

Rozhodování o aplikaci postupu stanovení životnosti jednotlivých objektů je podřízeno závěrům z diagnostických průzkumů, kterými je stanoven rozsah shromažďování základních údajů týkajících se životnosti a musí vycházet z doporučení pro stanovení životnosti pro jednotlivé objekty (**Příloha A**). Tato doporučení dále mohou uvádět, podle kterého z příkladů výpočtů obsažených v **Příloze B** má být při stanovení životnosti postupováno.

V **Příloze C** je uveden postup pro měření okamžité korozní rychlosti ocelových výztuží v betonu. Volba tohoto způsobu sledování stavu výztuže se rovněž stanoví v závěrech z diagnostických průzkumů provedených dle Přílohy A jako jedno z možných opatření v souvislosti se stanovením životnosti.

Literatura

- ¹ Jubb, J.: Overview of Service Life prediction – Materials Issues, Including QA and Certification, *The design Life of Structures*, G. Sommerville, ed. Blackie and Sons, Ltd., London, England, 1992
- ² Clifton, J.R., Knab L.I.: Service Life of Concrete, NISTIR 89-4086, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Md., 1989
- ³ Clifton, J. R.: Predicting Remaining Service Life of Concrete, NISTIR 4712, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Md., 1991
- ⁴ Whiting, D.: Permeability of Selected Concretes, Permeability of Concrete, SP 108, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., pp 195-222, 1988
- ⁵ Whiting, D.: Permeability of Selected Concretes, Permeability of Concrete, SP 108, *American Concrete Institute*, Farmington Hills, Mich., pp 195-222, 1988
- ⁶ Naus, D. J., and Oland, C. B. : Structural Aging program Technical Progress Report for Period Jan..1,1993 to June 30,1994, ORNL/NRC/LTR/21, Martin Marietta Energy System, Oak Ridge National laboratory, Oak Ridge, Nov. 1994
- ⁷ Rewerts, T. L., : Safety Requirements and Evaluation of Existing Buildings, *Concrete International*, V. 7, No. 4, Apr., pp. 50-55, 1985
- ⁸ Murphy, W. E., : Interpretation of tests on Strength of Concrete in Structures, In Situ/Nondestructive Testing of Concrete, SP-82, V. M. Malhotra, ad., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., pp 377-392, 1984
- ⁹ Service Life Prediction – State of the Art Report, ACI 365.1R-00, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA, 2000
- ¹⁰ Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures, ACI 228.2R, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA
- ¹¹ Turkstra, C.J., Zoltanetzky, J.P.: A Statistical Study of the Correlation between Field Penetration Strength and Field Cylinder Strength, Nondestructive Testing, SP 112, ACI, USA, 1988
- ¹² Hookham, C.J. : A Structural Aging Assessment Methodology for Concrete Structures in Nuclear Power Plants, ORNL/NRC/LTR/90/17, Martin Marietta Energy System, Oak Ridge National laboratory, Oak Ridge, 1991
- ¹³ Ellingwood, B. R., Mori, Y. : Probabilistic Methods for Condition Assessment and Life Prediction of Concrete Structures in Nuclear Plants, *Nuclear Engineering and Design*, 142, Elsevier Science S.A., North Holland, Amsterdam, The Netherlands, 1993
- ¹⁴ Clifton, J.R., Predicting Remaining Service Life of Concrete, NISTIR 4712, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Md., 1991
- ¹⁵ Clifton, J.R.: Clifton, J.R., Knab, L.I., Garboczi, E.J., Xiong, L.X.: Chloride ion Diffusion in Low Water to Solid Cement Pastes , NISTIR 4549, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Md., 1990
- ¹⁶ Tuuti, K.: Corrosion of Steel in Concrete, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Sweden, 1982
- ¹⁷ Tuuti, K.: Corrosion of Steel in Concrete, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Sweden, 1982
- ¹⁸ Bažant, Z.P.:Physical Model for Steel corrosion in Concrete Sea Structures – Theory, ASCE Journal of Structures Division, V.105 (ST6), ASCE, New York, June pp. 1137-1153, 1979

¹⁹ Crank, J.: The Mathematics of Diffusion, Oxford, 1975

²⁰ Amey, S. L., Johnson, D. A.: Predicting the Service Life of Concrete Marine Structures: An Environment Methodology, ACI Structural Journal, V. 95, No.2, Mar.-Apr., pp 205-214, 1998

²¹ Atkinson A., Hearne, J. A.: Mechanistic Model for Durability of Concrete Barriers Exposed to Sulphate- Bearing Groundwaters, *Materials Research Society Symposium*, Proceedings 176, pp 149-156, 1990

²² Jones, A.N.: Preliminary Field Studies of Rates of Dissolution of Hydrated Cement, *Magazine of Concrete Research*, V.41, No 148, pp.155-162, 1989

²³ Siemes, A., Vrouwenvelder, A.: Durability of Buildings: A Reliability Analysis, *Heron* 30, pp.3-48, 1985

²⁴ Martin, J., Embree E.: Effect of Contaminants and Cure Time on EPDM Single Ply Joint Strength, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1, ASCE, New York, pp 151-168, 1989

²⁵ Sentler, L.: Stochastic Characterization of Carbonation of Concrete, *Third International Conference on Durability of Building Materials and Components*, Technical Research Centre of Finland, Espoo, pp.569-580, 1984

²⁶ Rodriguez, J.R., Andrade C.: Load-Bearing Capacity Loss in Corroding Structures, presented at *ACI 1990 Spring Convention*, Toronto, Canada, Mar. 18-23, 1990

²⁷ Pommersheim, J.M., Clifton, J.R.: Models of Transport Processes in Concrete, NISTIR 4405, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Md., 1990

²⁸ ASTM E 1185

²⁹ ASTM E 917

³⁰ ASTM E 964

³¹ ASTM E 1057

³² ASTM E 1074

³³ ASTM E 1121

³⁴ ASTM E 1369

