

GRAĐEVINSKI FAKULTET
UNIVERZITETA U BEOGRADU
Odsek za konstrukcije
Katedra za materijale i konstrukcije
Master studije (28+28)
I semester (2+2)
V.prof. dr Ivan Ignjatović

SANACIJE, REKONSTRUKCIJE I ODRŽAVANJE BETONSKIH KONSTRUKCIJA U VISOKOGRADNJI



UPOTREBNI VEK

- Upotrebni vek:
 - Tehnički
 - Funkcionalni
 - Ekonomski
- Dužina upotrebno­g veka (ISO 2394):

Kategorija	Proračunski upotrebni vek [god]	Primeri
1	10	Privremeni objekti
2	10 do 25	Zamenjivi delovi konstrukcije, nosači, ležišta
3	15 do 30	Poljoprivredni i drugi slični objekti
4	50	Zgrade i slične konstrukcije
5	100 i više	Monumentalne zgrade ili objekti, mostovi



TIPOVI GRANIČNIH STANJA (SA ASPEKTA TRAJNOSTI)

- Granično stanje upotrebljivosti (SLS)
- Granično stanje nosivosti (ULS)



Granično stanje upotrebljivosti (SLS)



Granično stanje nosivosti (ULS)



Granično stanje upotrebljivosti (SLS)



Granično stanje nosivosti (ULS)



Granično stanje nosivosti (ULS)



PROJEKTOVANJE PREMA UPOTREBNOM VEKU (SERVICE LIFE DESIGN, *fib*, 2006)

- Model propisa
- Projektovanje u odnosu na trajnost betonskih konstrukcija bazirano na:
 - Ponašanju (engl. *Performance based durability design*)
 - Pouzdanosti
- Postupak proračuna u 4 koraka



POUZDANOST KONSTRUKCIJE

- ISO 2394: Opšti principi pouzdanosti za zgrade: sposobnost konstrukcije da zadovolji postavljene zahteve pod specifičnim uslovima tokom upotrebnog veka, prema kome je projektovana
- EN 1990: 2002: ...nosivost, upotrebljivost, trajnost



POUZDANOST KONSTRUKCIJE

- Ponašanje konstrukcije opisano grupom promenljivih $X = [X_1, \dots, X_n]$
- Funkcija graničnog stanja $Z(X)$
 - $Z(X) \geq 0$ bezbedno stanje konstrukcije
 - $Z(X) < 0$ neželjeno stanje (lom) konstrukcije
- Verovatnoća loma, P_f $P_f = P\{Z(X) < 0\}$
- Indeks pouzdanosti, β $\beta = -\Phi_U^{-1}(P_f)$

P_f	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
β	1.28	2.32	3.09	3.72	4.27	4.75	5.20



POUZDANOST KONSTRUKCIJE

- EN 1990: 2002: tri klase pouzdanosti: RC1, RC2, RC3

Klasa prema pouzdanosti	Minimalne vrednosti za β	
	ref. period 1 god.	ref. period 50 god.
RC1	5.2	4.3
RC2	4.7	3.8
RC3	5.2	3.3

- EN 1990: 2002: indeks β za klasu RC2

Granično stanje	Ciljni indeks pouzdanosti, β	
	ref. period 1 god.	ref. period 50 god.
Nosivost	4.7	3.8
Upotrebljivost	2.9	1.5



POUZDANOST KONSTRUKCIJE

- EN 1990: 2002: klase prema posledicama (CC1,CC2,CC3)

Klase posledica	Opis	Primeri zgrada ili građevinskih radova
CC3	Teške posledice usled gubitka ljudskih života ili velike ekonomske socijalne i posledice po okolinu	Tribine , javne zgrade gde bi posledice loma bile teške (koncertne dvorane)
CC2	Prihvatljive posledice usled gubitka ljudskih života , prihvatljive ekonomske i posledice po okolinu	Poslovne i stambene zgrade, javne zgrade gde su posledice loma srednje
CC1	Blage posledice usled gubitka ljudskih života i male ekonomske socijalne i posledice po okolinu	Poljoprivredni objekti gde ljudi obično ne ulaze (skladišta)

- CC3→ RC1, CC2→ RC2, CC1→ RC3



POUZDANOST KONSTRUKCIJE

- Vrsta konstrukcije  klasa posledica (CC)
- Klasa posledica  klasa pouzdanosti (RC)
- Klasa pouzdanosti + tip graničnog stanja
 indeks pouzdanosti (β)
- Indeks pouzdanosti  koeficijent sigurnosti



POUZDANOST KONSTRUKCIJE

- Indeksi pouzdanosti prema predlogu Modela propisa (***fib***, 2006)

Opis	Klasa pouzdanosti	SLS	ULS
		Depasivizacija	Lom
Korozija izazvana karbonizacijom	RC1	1.3 ($p_f \approx 10^{-1}$)	3.7 ($p_f \approx 10^{-1}$)
	RC2	1.3 ($p_f \approx 10^{-1}$)	4.2 ($p_f \approx 10^{-1}$)
	RC3	1.3 ($p_f \approx 10^{-1}$)	4.4 ($p_f \approx 10^{-1}$)
Korozija izazvana hloridima iz vazduha, soli protiv smrzavanja	RC1	1.3 ($p_f \approx 10^{-1}$)	3.7 ($p_f \approx 10^{-1}$)
	RC2	1.3 ($p_f \approx 10^{-1}$)	4.2 ($p_f \approx 10^{-1}$)
	RC3	1.3 ($p_f \approx 10^{-1}$)	4.4 ($p_f \approx 10^{-1}$)
Korozija izazvana hloridima iz morske vode	RC1	1.3 ($p_f \approx 10^{-1}$)	3.7 ($p_f \approx 10^{-1}$)
	RC2	1.3 ($p_f \approx 10^{-1}$)	4.2 ($p_f \approx 10^{-1}$)
	RC3	1.3 ($p_f \approx 10^{-1}$)	4.4 ($p_f \approx 10^{-1}$)



POUZDANOST KONSTRUKCIJE

- EN 1990: 2002: tri klase pouzdanosti: RC1, RC2, RC3

Klasa prema pouzdanosti	Minimalne vrednosti za β	
	ref. period 1 god.	ref. period 50 god.
RC1	5.2	4.3
RC2	4.7	3.8
RC3	5.2	3.3

- EN 1990: 2002: indeks β za klasu RC2

Granično stanje	Ciljni indeks pouzdanosti, β	
	ref. period 1 god.	ref. period 50 god.
Nosivost	4.7	3.8
Upotrebljivost	2.9	1.5



PRORAČUNSKI DOKAZI

- (Pot)puna probabilistička metoda
- Metoda parcijalnih koeficijenata sigurnosti
- Iskustvene preporuke
- Postupci za sprečavanje deterioracije
- Metoda indikatora trajnosti



Puna probabilistička metoda

- Model deterioracionog procesa
- Definisanje parametara modela
- Predstavljanje parametara preko funkcije raspodele
- Definisanje jednačine graničnog stanja (grupisane vrednosti uticaja od dejstava, E i otpornosti, R)
- Jednačina metode: $p\{\} = p_{dep} = p\{R < E\} < p_0$
- Više parametara – složeniji postupak – programi (STRUREL)
- Primena za izuzetno značajne objekte



Metoda parcijalnih koeficijenata sigurnosti

- Proračunski dokaz da za sve relevantne proračunske situacije, nijedno relevantno granično stanje nije prekoračeno
- Model deterioracionog procesa
- proračunske vrednosti dejstava, uticaja od dejstava i nostivosti  koeficijenti sigurnosti



Metoda parcijalnih koeficijenata sigurnosti

- Proračunske vrednosti dejstava date su kao:

$$E_d = \gamma_e \cdot E_k$$

- Proračunske vrednosti otpornosti ili svojstava materijala

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_m}$$

- Karakteristične vrednosti – ispitivanja pod specifičnim uslovima, faktori konverzije



Iskustvene preporuke

- Dimenzionisanje
- Izbor materijala
- Procedure izvođenja

- Nema modela i parametara procesa deterioracije

- Aktuelni način obezbeđivanja trajnosti



Postupci za sprečavanje procesa deterioracije

- Nema proračuna, nema kvantifikacije parametara
- Mere zaštite i stvaranje uslova u kojima beton neće biti izložen agresivnom dejstvu sredine
- upotreba fasada,
- membrana,
- korišćenja nereaktivnih materijala (nerđajući čelik)
- primena elektrohemijske metode za sprečavanje korozije armature.



Metoda indikatora trajnosti

- Ne izvodi se jednačina graničnog stanja
- Tabulisane limitirajuće vrednosti indikatora trajnosti
- Indikatori trajnosti - ključnih parametara modela mehanizma deterioracije (poroznost, koeficijent difuzije hloriga, permeabilnost...).
- Hibridna metoda, nastavak EC2 metodologije



TRAJNOST KROZ PROPISE

- Prateći standard EN 206-1:2002: vodocementni faktor, količina cementa, sadržaj uvučenog vazduha

	Exposure classes																	
	No risk of corrosion or attack	Carbonation-induced corrosion				Chloride-induced corrosion						Freeze/thaw attack				Aggressive chemical environments		
						Sea water			Chloride other than sea water									
		X0	XC 1	XC 2	XC 3	XC 4	XS 1	XS 2	XS 3	XD 1	XD 2	XD 3	XF 1	XF 2	XF 3	XF 4	XA 1	XA 2
Maximum w/c	---	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,45	0,55	0,55	0,45	0,55	0,55	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45
Minimum strength class	C12/15	C20/25	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C35/45	C30/37	C30/37	C35/45	C30/37	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45
Minimum cement content (kg/m³)	---	260	280	280	300	300	320	340	300	300	320	300	300	320	340	300	320	360
Minimum air content (%)	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	4,0 ¹⁾	4,0 ¹⁾	4,0 ¹⁾	---	---	---
Other requirements												Freeze/thaw resisting aggregates in accordance with the recommendations in prEN 12620:1996				Sulfate-resisting cement 2)		



> 120 years <i>So-called exceptional structures</i> Level 5	from 100 to 120 years <i>Large structures</i> Level 4	from 50 to 100 years <i>Building & civil engineering structures</i> Level 3	from 30 to 50 years <i>Building</i> Level 2	< 30 years Level 1	← Required service life / Structure category / Requirement level ←		Type of environment →	Carbonation-induced corrosion (th = 30 mm)
• P _{water} < 9 • K _{gas} < 10	• P _{water} < 12 • K _{gas} < 100	• P _{water} < 14 ⁽⁶⁾	• P _{water} < 16	• P _{water} < 16	Dry and very dry (RH<65%) or permanently humid		1	
• P _{water} < 9 • k _{liq} < 0.01	• P _{water} < 12 • K _{gas} < 100	• P _{water} < 14 ⁽⁶⁾	• P _{water} < 16	• P _{water} < 16	Humid (RH>80%)		2	
• P _{water} < 9 • K _{gas} < 10 • k _{liq} < 0.01	• P _{water} < 9 • K _{gas} < 10 ⁽⁴⁾	• P _{water} < 12 ⁽⁷⁾ • K _{gas} < 100 ⁽⁸⁾	• P _{water} < 14 ⁽⁵⁾	• P _{water} < 15	Moderately humid (65<RH<80%)		3	
• P _{water} < 9 • D _{app(mig)} < 1 • K _{gas} < 10 • k _{liq} < 0.01	• P _{water} < 9 • K _{gas} < 10 • k _{liq} < 0.01	• P _{water} < 12 ⁽⁷⁾ • K _{liq} < 0.1 ⁽⁹⁾	• P _{water} < 14 ⁽⁶⁾	• P _{water} < 16	Frequent wetting-drying cycles		4	Chloride-induced corrosion (th = 50 mm)
• P _{water} < 9 • D _{app(mig)} < 10 • K _{gas} < 10 • k _{liq} < 0.01	• P _{water} < 12 • D _{app(mig)} < 20 • K _{liq} < 0.1 ⁽³⁾	• P _{water} < 14	• P _{water} < 15	• P _{water} < 16	5.1 Low [Cl-] ⁽¹⁾	Exposure to marine salts or deicing salts	5	
• P _{water} < 9 • D _{app(mig)} < 1 • K _{gas} < 10 • k _{liq} < 0.01	• P _{water} < 9 • D _{app(mig)} < 1 • K _{gas} < 10 • k _{liq} < 0.01	• P _{water} < 11 • D _{app(mig)} < 2 • K _{liq} < 0.1 ⁽³⁾	• P _{water} < 11	• P _{water} < 14	5.2 High [Cl-] ⁽²⁾			
• P _{water} < 9 • D _{app(mig)} < 1	• P _{water} < 12 • D _{app(mig)} < 5	• P _{water} < 13 • D _{app(mig)} < 7	• P _{water} < 13	• P _{water} < 15	Submersion in water containing chlorides		6	
• P _{water} < 9 • D _{app(mig)} < 1 • K _{gas} < 10 • k _{liq} < 0.01	• P _{water} < 10 • D _{app(mig)} < 2 • K _{gas} < 100 • k _{liq} < 0.05	• P _{water} < 11 • D _{app(mig)} < 3 • K _{liq} < 0.1 ⁽³⁾	• P _{water} < 11	• P _{water} < 14	Tidal zone		7	



Metoda indikatora trajnosti

- Ključne razlike:
 - korišćenje parametara iz odgovarajućeg modela mehanizma deterioracije
 - vrednosti indikatora trajnosti za različita trajanja upotrebnog veka
- Primena: naročito pogodna metoda za određivanje aktuelnog stanja konstrukcije sa aspekta trajnosti



ZAKLJUČAK

- Aktuelni pristup:
 - Nema kvantifikacije stvarnih uslova izloženosti
 - Upotrební vek nije normiran
 - Nisu poznata granična stanja koja mogu biti dostignuta
 - Nema sigurne baze za iskustvene preporuke
 - Trajnost – deo projekta od sekundarnog značaja



PRORAČUNSKI DOKAZ ZA GRANIČNO STANJE DEPASIVIZACIJA ARMATURE USLED KARBONIZACIJE

- Primena pune probabilističke metode
- Jednačina metode: $p\{\} = p_{dep} = p\{R - E < 0\} < p_0$
- Jednačina graničnog stanja:

$$p\{\} = p_{dep} = p\{a - x_c(t_{SL}) < 0\} < p_0$$

- $p\{\}$ – verovatnoća da se desi depasivizacija armature
- a – debljina zaštitnog sloja [mm]
- $x_c(t_{SL})$ – dubina karbonizacije nakon vremena t_{SL} [mm]
- t_{SL} – proračunski upotrební vek [godine]
- p_0 – zahtevana (ciljna) vrednost verovatnoće



PRORAČUNSKI DOKAZ ZA GRANIČNO STANJE DEPASIVIZACIJA ARMATURE USLED KARBONIZACIJE

- Proračun dubine karbonizacije (DuraCrete, Darts):

$$x_c(t) = \sqrt{2 \cdot k_e \cdot k_c \cdot (k_t \cdot R_{ACC,0}^{-1} + \varepsilon_t) \cdot C_s} \cdot \sqrt{t} \cdot W(t)$$

$x_c(t)$ – dubina karbonizacije u određenom trenutku vremena t [mm]

t – vreme [godine]

k_e – funkcija okoline

k_c – parametar izvođenja

k_t – parametar povraćaja

$R_{ACC,0}^{-1}$ – inverzna vrednost otpornosti betona na karbonizaciju
[(mm²/god)/(kg/m³)]

ε_t – greška

C_s – koncentracija CO₂ u vazduhu [kg/m³]

$W(t)$ – funkcija vremenskih prilika.



KVANTIFIKACIJA PARAMETARA

Funkcija okoline, k_e

- Uticaj nivoa vlažnosti na koeficijent difuzije CO₂
- Referentni klimatski podaci:
 - Relativna vlažnost vazduha: RH=65%

$$k_e = \left(\frac{1 - \left(\frac{RH_{real}}{100} \right)^{f_e}}{1 - \left(\frac{RH_{ref}}{100} \right)^{f_e}} \right)^{g_e}$$

- Podaci iz obližnje meteorološke stanice
- Beta ili Weibull-ova raspodela



KVANTIFIKACIJA PARAMETARA

Parametar izvođenja, k_c

- Uticaj nege betona na efektivnu otpornost betona na karbonizaciju

$$k_c = \left(\frac{t_c}{7} \right)^{b_c}$$

- k_c - parametar izvođenja
- b_c - eksponent regresije
- t_c - period negovanja [dani].

■ Normalna raspodela

- Srednja vrednost
- Standardna devijacija

$$\mu = -0,567 \quad \sigma = 0,024$$



KVANTIFIKACIJA PARAMETARA

Inverzna karbonizациона otpornost, $R_{ACC,0}^{-1}$

- Određuje se ubrzanim karbonizacionim testovima (ACC test), u laboratorijskim uslovima

$$R_{ACC,0}^{-1} = \left(\frac{x_c}{\tau} \right)^2$$

- Odnos inverznih karbonizacionih otpornosti betona pod laboratorijskim i prirodnim uslovima:

$$R_{NAC,0}^{-1} = k_t \cdot R_{ACC,0}^{-1} + \varepsilon_t$$

k_t – parametar regresije koji uzima u obzir uticaj ubrzanog testa na rezultate dobijene pod prirodnim uslovima (normalna raspodela)

ε_t – faktor greške koji uzima u obzir netačnosti koje se dešavaju povremeno kada se koristi ACC test (normalna raspodela)



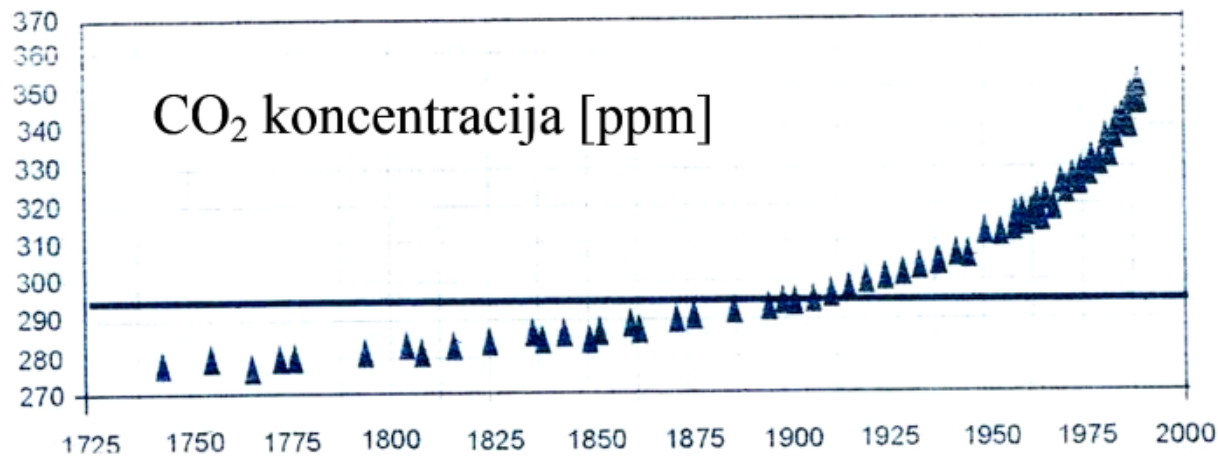
KVANTIFIKACIJA PARAMETARA

Uticaj sredine, C_s

- Koncentracija CO_2 u vazduhu

$$C_s = C_{s,atm.} + C_{s,emi.}$$

- Tunelske konstrukcije, dimnjaci
- Trend rasta koncentracije CO_2



KVANTIFIKACIJA PARAMETARA

Funkcija vremenskih prilika, W

- Uticaj lokalnih klimatskih uslova – vlaženje površine betona

$$W = \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{(p_{SR} \cdot ToW)^{b_w}}{2}} = \left(\frac{t_0}{t} \right)^w$$

- t_0 – referentno vreme [god], konstantan parametar čija je vrednost 0,0767 (28 dana)
- w – eksponent vremena
- ToW – vreme vlaženja : $ToW = \frac{\text{broj_kišnih_dana_u_godini}}{365}$
- p_{SR} – verovatnoća jake kiše sa vetrom
- b_w – eksponent regresije,



PRORAČUNSKI DOKAZ ZA GRANIČNO STANJE DEPASIVIZACIJA ARMATURE USLED KARBONIZACIJE

- Proračun dubine karbonizacije (AFGC):

$$x_c(t) = \gamma \cdot f(RH) \cdot k \cdot \sqrt{t}$$

γ – faktor izloženosti karbonizaciji

$f(RH)$ – uticaj relativne vlažnosti vazduha

k – karakteristika prenosa kroz beton (funkcija klase čvrstoće betona)



PRORAČUNSKI DOKAZ ZA GRANIČNO STANJE DEPASIVIZACIJA ARMATURE USLED KARBONIZACIJE

γ –faktor izloženosti karbonizaciji

Tip konstrukcije	Faktor izloženosti karbonizaciji (γ)
Konstrukcije izložene visokoj koncentraciji CO ₂	1.5
Konstrukcije zaštićene od kiše	1.2
Konstrukcije izuzetno izložene padavinama	0.9

k –karakteristika prenosa kroz beton (funkcija klase čvrstoće betona)

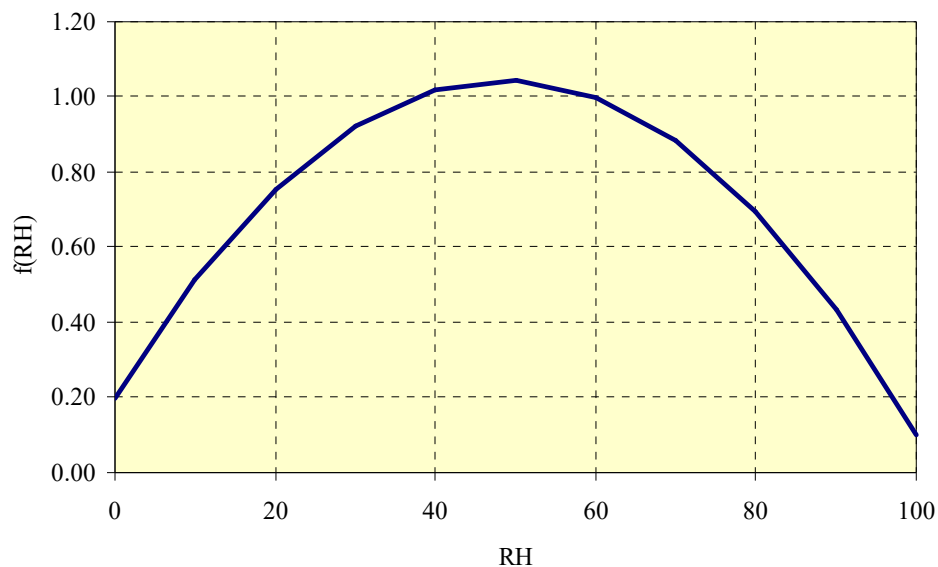
$$k = \sqrt{365} \cdot \left(\frac{1}{2.1 \sqrt{R_{C28}}} - 0.06 \right)$$



PRORAČUNSKI DOKAZ ZA GRANIČNO STANJE DEPASIVIZACIJA ARMATURE USLED KARBONIZACIJE

$f(RH)$ –uticaj relativne vlažnosti vazduha

$$f(RH) = -3.5833 \cdot RH^2 + 3.4833 \cdot RH + 0.2$$



PRORAČUNSKI DOKAZ ZA GRANIČNO STANJE DEPASIVIZACIJA ARMATURE USLED KARBONIZACIJE

- Primena metode parcijalnih koeficijenata sigurnosti
- Jednačina graničnog stanja:

$$a_d - x_{c,d}(t_{SL}) \geq 0$$

a_d – proračunska vrednost debljine zaštitnog sloja [mm] $a_d = a_k - \Delta a$

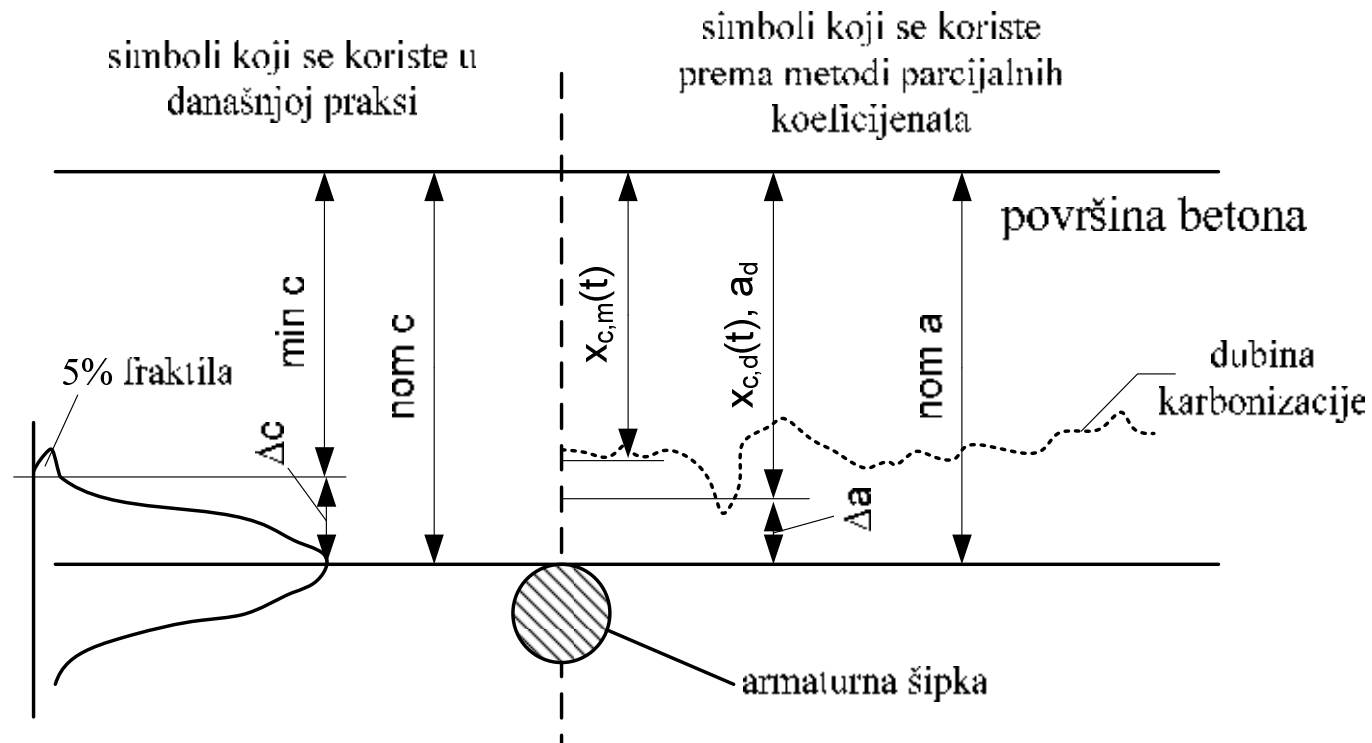
$x_{c,d}(t_{SL})$ – proračunska vrednost dubine karbonizacije u vremenu t_{SL} [mm].

$$x_{c,d}(t_{SL}) = \sqrt{2 \cdot k_{e,d} \cdot k_{c,d} \cdot (k_{t,d} \cdot R_{ACC,0,k}^{-1} \cdot \gamma_R + \varepsilon_{t,d}) \cdot C_{S,d}} \cdot \sqrt{t_{SL}} \cdot W(t_{SL})$$

$$x_c(t) = \sqrt{2 \cdot k_e \cdot k_c \cdot (k_t \cdot R_{ACC,0}^{-1} + \varepsilon_t) \cdot C_S} \cdot \sqrt{t} \cdot W(t)$$



PRORAČUNSKI DOKAZ ZA GRANIČNO STANJE DEPASIVIZACIJA ARMATURE USLED KARBONIZACIJE



$$\text{Evrokod 2: } a_{\text{nom}} = a_{\text{min}} + \Delta a$$



BROJNI PRIMER_1

- Fasadni betonski element, izložen sušenju i vlaženju
- Metoda parcijalnih koeficijenata sigurnosti
- Debljina zaštitnog sloja u funkciji vremena?
- Ključni parametri:
 - funkcija okoline k_e
 - inverzna karbonizациона otpornost betona određena ubrzanim testovima $R_{ACC,0}^{-1}$
 - debljina zaštitnog sloja a
- Indeks pouzdanosti: $\beta=1,3$  koeficijenti sigurnosti !



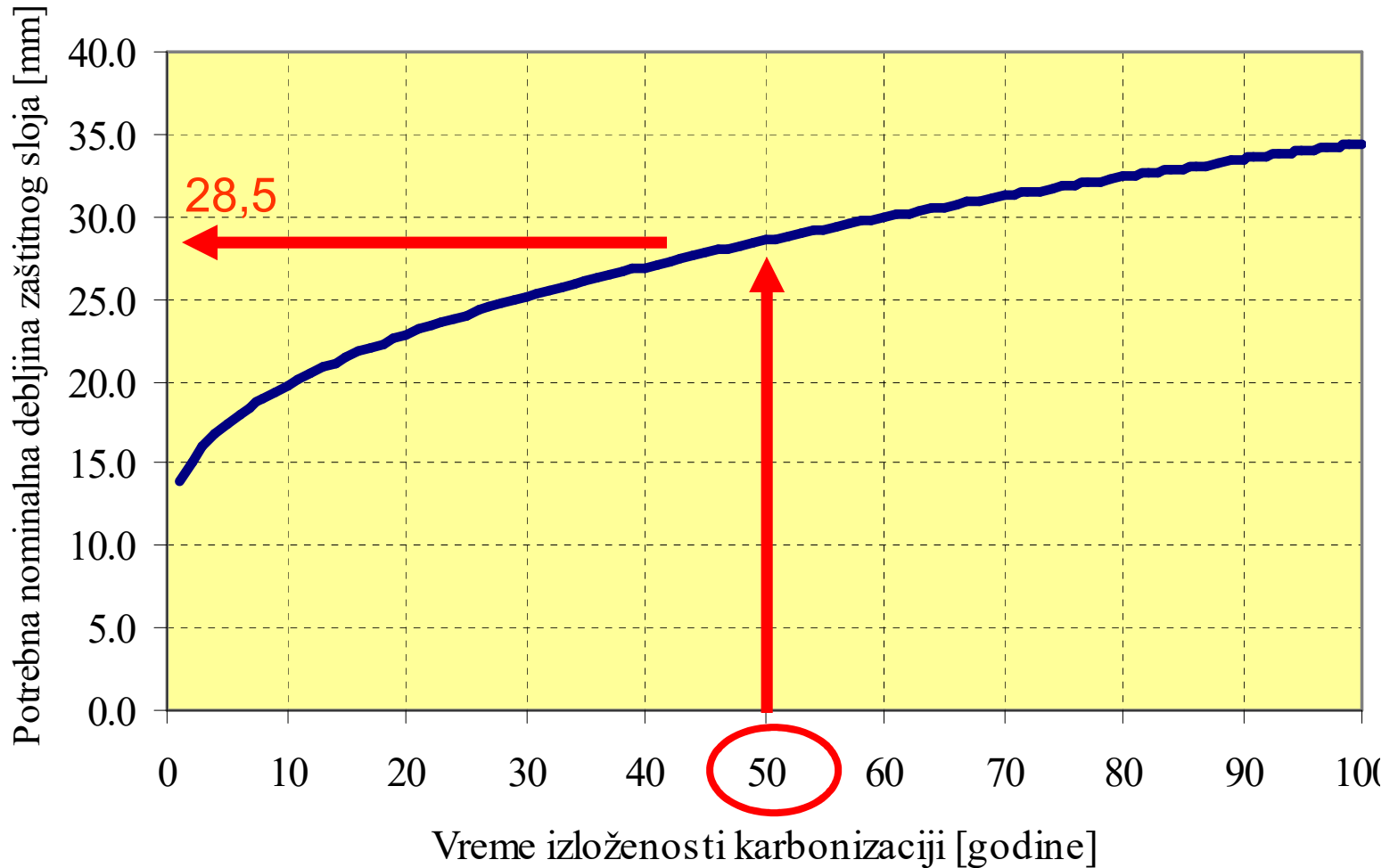
BROJNI PRIMER_1

Parametar		Jedinica	Ulazni podatak
$k_{e,d}$	$RH_{real,k}$	[% rel. vlažnosti]	80
	RH_{ref}	[% rel. vlažnosti]	65
	γ_{RH}	[-]	1.3
	g_e	[-]	2.5
	f_e	[-]	5.0
$k_{c,d}$	b_c	[-]	-0.567
	t_c	[dan]	3.0
$R_{NAC,0,d}^{-1}$	$k_{t,d}$	[-]	1.25
	$R_{ACC,0,k}^{-1}$	$[(mm^2/god)/(kgCO_2/m^3)]$	4500
	γ_R	[-]	1.5
	$\varepsilon_{t,d}$	$[(mm^2/god)/(kgCO_2/m^3)]$	315.5
$C_{S,d}$		$[kgCO_2/m^3]$	0.00082
t_{SL}		[godine]	0-100
W	ToW	[-]	0.27
	$b_{w,d}$	[-]	0.446
	p_{SR}	[-]	0.1
	t_0	[god]	0.0767
x_d	x_{nom}	[mm]	?

Sanacije i konstrukcije i održavanje betonskih konstrukcija

BROJNI PRIMER_1

$$x_{c,d}(t_{SL}) = \sqrt{2 \cdot k_{e,d} \cdot k_{c,d} \cdot (k_{t,d} \cdot R_{ACC,0,k}^{-1} \cdot \gamma_R + \varepsilon_{t,d}) \cdot C_{S,d}} \cdot \sqrt{t_{SL}} \cdot W(t_{SL})$$



BROJNI PRIMER_1

- Fasadni betonski element, izložen sušenju i vlaženju, klimatski prostor- Srednja Evropa
- Debljina zaštitnog sloja prema BAB 87?
- Član 113: "srednje" agresivna sredina: za elemente koji su izloženi vlazi, atmosferskim i slabijim korozivnim uticajima
- $a = a_0 + \Delta a = 2,0 \text{ cm} + 0,5 = 2,5 \text{ cm}$
- Montažni element: $a = 2,5 - 0,5 = 2,0 \text{ cm}$
- Upotrební vek?



PRORAČUNSKI DOKAZ ZA GRANIČNO STANJE DEPASIVIZACIJA ARMATURE USLED PENETRACIJE HLORIDA

- Primena pune probabilističke metode
- Jednačina metode: $p\{\} = p_{dep} = p\{R - E < 0\} < p_0$
- Jednačina graničnog stanja:

$$p\{\} = p_{dep} = p\{C_{crit} - C(a, t_{SL}) < 0\} < p_0$$

- $p\{\}$ – verovatnoća da se desi depasivizacija armature
- a – debljina zaštitnog sloja [mm]
- C_{crit} – kritična koncentracija hlorida
- $C(a, t_{SL})$ – koncentracija hlorida na dubini a od površine betona, nakon vremena t_{SL}
- p_0 – zahtevana (ciljna) vrednost verovatnoće.



PRORAČUNSKI DOKAZ ZA GRANIČNO STANJE DEPASIVIZACIJA ARMATURE USLED PENETRACIJE HLORIDA

- Proračun koncentracije hlorida (DuraCrete, Darts):

$$C_{crit} = C(x = a, t) = C_0 + (C_{S, \Delta x} - C_0) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \frac{a - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{app, C} \cdot t}} \right]$$

C_{crit} – kritični sadržaj hlorida [tež.-%/beton],

$C(x, t)$ –sadržaj hlorida u betonu na dubini x (površina betona: $x=0$) i u vremenu t [tež.-%/beton],

C_0 – inicijalni sadržaj hlorida u betonu [tež.-%/c],

$C_{S, \Delta x}$ – sadržaj hlorida u betonu na dubini Δx , u određenom trenutku vremena t [tež.-%/beton],

x – dubina sa odgovarajućim sadržajem hlorida $C(x, t)$,

a – debljina zaštitnog sloja [mm],

Δx – dubina konvekcione zone [mm],

$D_{app, C}$ – koeficijent difuzije hlorida kroz beton [mm²/god],

t – vreme [god],



erf – funkcija greške (engl. error function)

Sanacije, rekonstrukcije i održavanje betonskih konstrukcija

- Difuziono kontrolisan proces (2. Fick-ov zakon)
- Konvekciona zona
- Koeficijent difuzije $D_{app,c}$ – metoda hlorldnog profila

$$D_{app,C} = k_e \cdot D_{RCM,0} \cdot k_t \cdot A(t)$$

k_e – parametar prenosa uticaja sredine,

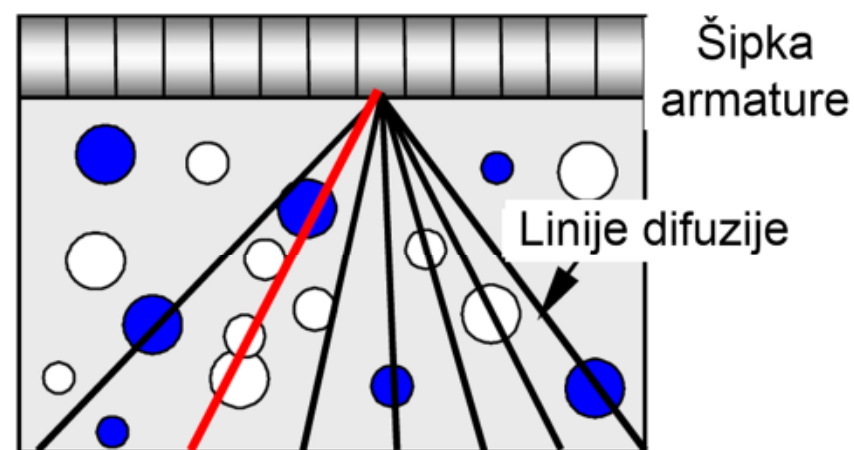
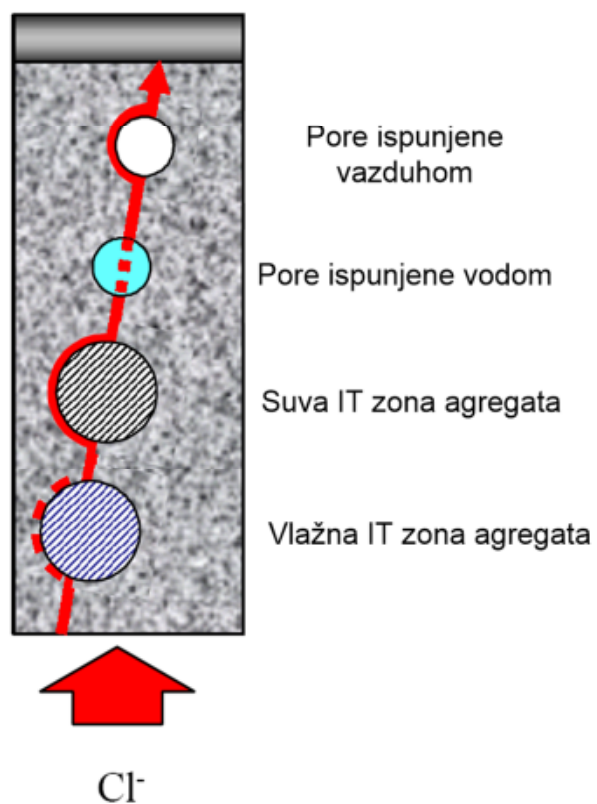
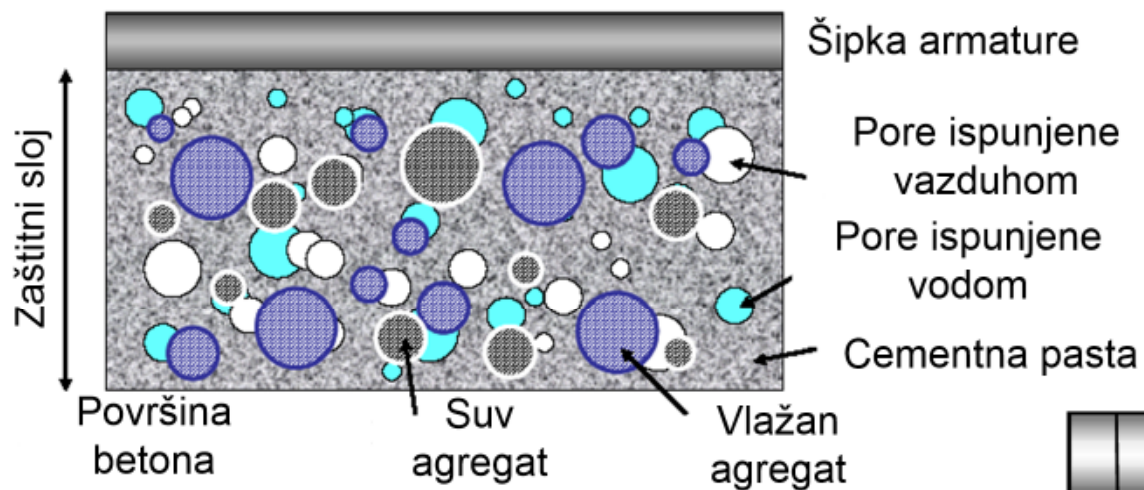
$D_{RCM,0}$ –koeficijent migracije hlorlda [mm²/god] –*rapid test methods*

k_t – parametar prenosa,

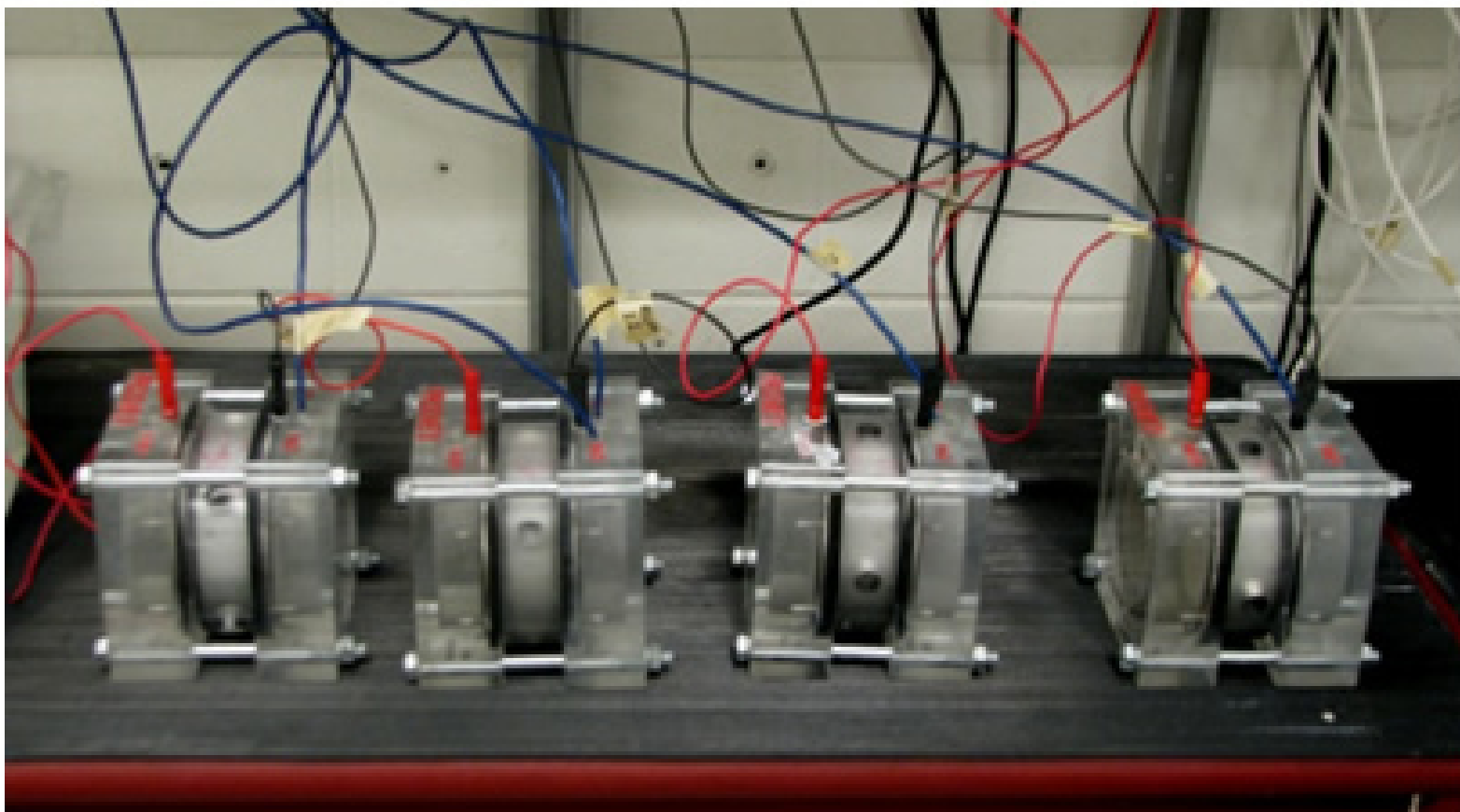
$A(t)$ – podfunkcija koje se odnosi na starenje.

$$A(t) = \left(\frac{t_0}{t} \right)^a$$





60V applied potential
and current readings



KVANTIFIKACIJA PARAMETARA

Koeficijent migracije hloriga, $D_{RCM,0}$

- Najznačajniji parametar modela
- Podaci iz literature ili određeni na osnovu *Rapid Chloride Migration method (RCM)*

$D_{RCM,0}$ [m ² /s]	$w/c_{eqv.}^{-1}$					
tip cementa	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60
CEM I 42.5 R	n.d. ²	$8.9 \cdot 10^{-12}$	$10.0 \cdot 10^{-12}$	$15.8 \cdot 10^{-12}$	$19.7 \cdot 10^{-12}$	$25.0 \cdot 10^{-12}$
CEM I 42.5 R + FA (k=0.5)	n.d. ²	$5.6 \cdot 10^{-12}$	$6.9 \cdot 10^{-12}$	$9.0 \cdot 10^{-12}$	$10.9 \cdot 10^{-12}$	$14.9 \cdot 10^{-12}$
CEM I 42.5 R + SF (k=2.0)	$4.4 \cdot 10^{-12}$	$4.8 \cdot 10^{-12}$	n.d. ²	n.d. ²	$5.3 \cdot 10^{-12}$	n.d. ²
CEM III/B 42.5	n.d. ²	$1.4 \cdot 10^{-12}$	$1.9 \cdot 10^{-12}$	$2.8 \cdot 10^{-12}$	$3.0 \cdot 10^{-12}$	$3.4 \cdot 10^{-12}$



KVANTIFIKACIJA PARAMETARA

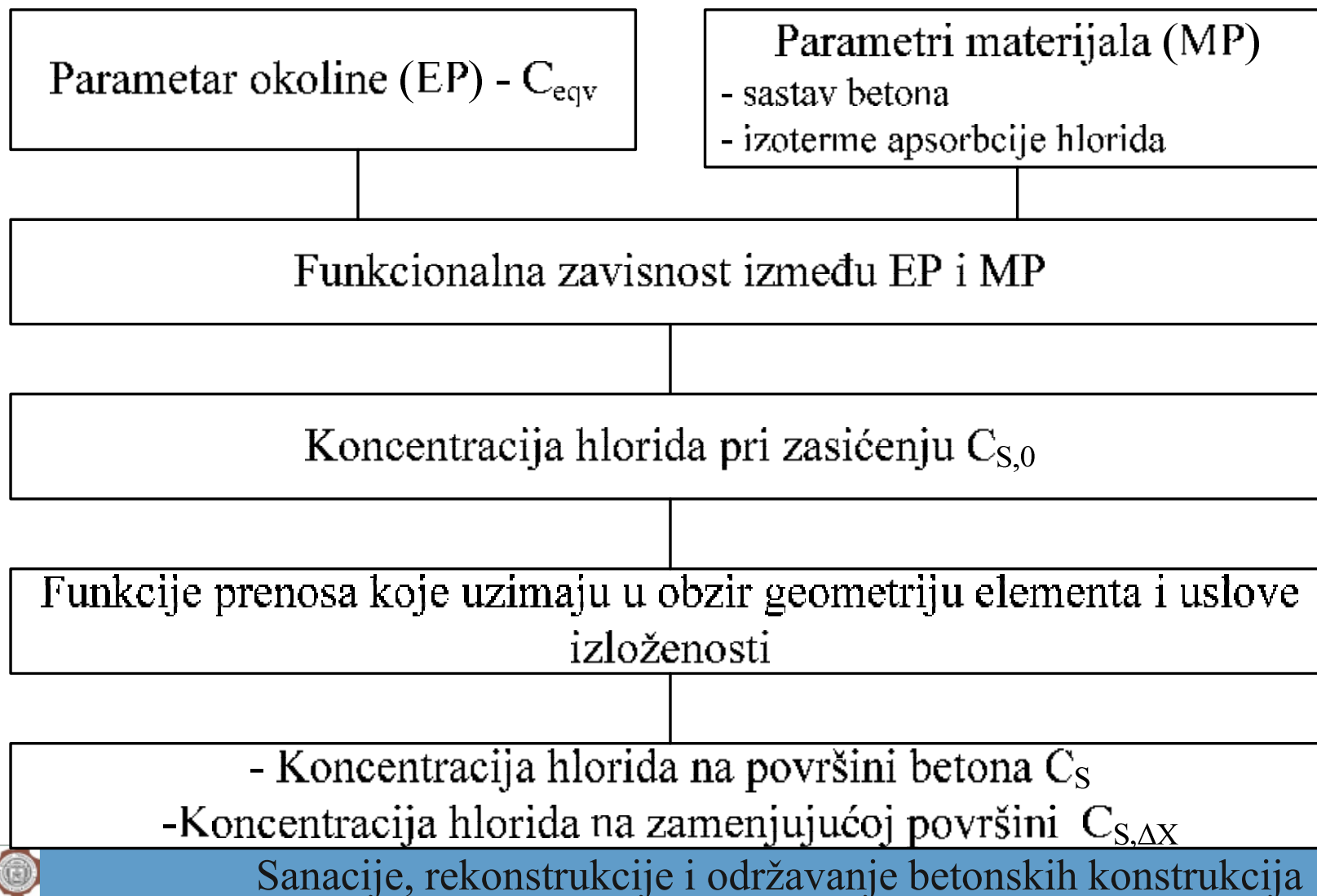
Inicijalni sadržaj hlorida, C_0

- Izvor
 - hloridima zagađeni agregat
 - cementa
 - Voda
- Ravnomerna raspodela po poprečnom preseku



KVANTIFIKACIJA PARAMETARA

Sadržaj hlorida na zamenjujućoj površini $C_{s,\Delta x}$



KVANTIFIKACIJA PARAMETARA

Sadržaj hlorida na zamenjujućoj površini $C_{s,\Delta x}$

- Uticaj sredine:
 - ekvivalentna koncentracija hlorida u vazduhu
 - rastojanje od izvora hlorida
- Parametar okoline – kvantifikacija potencijalog uticaja sredine (koja sadrži hloride) na beton
- Potencijal hlorida koji potiču od soli u morskoj vodi:

$$C_{eqv} = C_{0,M}$$



KVANTIFIKACIJA PARAMETARA

Sadržaj hlorida na zamenjujućoj površini $C_{s,\Delta x}$

- Potencijal hlorida koji potiču od soli protiv smrzavanja:

$$C_{eqv} = C_{0,R} = \frac{n \cdot c_{R,i}}{h_{S,i}}$$

$C_{0,R}$ – prosečan sadržaj hlorida u hloridno kontaminiranoj vodi

n – prosečan broj posipanja soli tokom godine,

$c_{R,i}$ – prosečna količina rasutih hlorida tokom jednog posipanja soli

$h_{S,i}$ – količina vode od kiše i otopljenog snega tokom jedne zimske sezone (dok traje posipanje soli)



KVANTIFIKACIJA PARAMETARA

Sadržaj hlorida na zamenjujućoj površini $C_{s,\Delta x}$

- C_{eqv} + izoterme apsorpcije hlorida 
koncentracija hlorida pri zasićenju, $C_{s,0}$
- Beton pod stalnim uticajem hlorida konstantne koncentracije (npr. u morskoj vodi):
 $C_{s,0} = C_s$
- Beton pod povremenim uticajem hlorida promenljive koncentracije 
Funkcija prenosa, Δx



KVANTIFIKACIJA PARAMETARA

Funkcija prenosa, Δx

- “zona zapljuskivanja” (engl. *splash zone*),
 - “plimska zona” (engl. *tidal zone*),
 - “potopljena zona” (engl. *submerged zone*),
 - “zonu prskanja” (engl. *spray zone*),
 - “atmosfersku zona” (engl. *atmospheric zone*),
-
- “zona zapljuskivanja” : $6,0 \text{ mm} \leq \Delta x \leq 11,0 \text{ mm}$
 - “plimska zona”: Δx
 - “potopljena zona” : $\Delta x=0$
 - “zonu prskanja” : $\Delta x=0$



KVANTIFIKACIJA PARAMETARA

Kritični sadržaj hlorida C_{crit}

- Ukupni sadržaj hlorida koji vodi do depasivizacije armature
- $C_{crit,min} = 0,40$ tež.-%/cement (AFGE)
- $C_{crit,min} = 0,35$ tež.-%/cement (BS)
- $C_{crit,min} = 0,20$ tež.-%/cement (**fib**, Model Code)



$$P_f = P\{Z(X) < 0\}$$

PRORAČUNSKI DOKAZ ZA GRANIČNO STANJE DEPASIVIZACIJA ARMATURE USLED PENETRACIJE HLORIDA

- Primena metode parcijalnih koeficijenata sigurnosti
- Jednačina graničnog stanja:

$$C_{Crit}^d - C^d(x, t) \geq 0$$

- C_{Crit}^d – proračunska kritična vrednost koncentracije hlorida
- $C_d(x, t)$ – proračunska vrednost koncentracije hlorida na rastojanju x od spoljašnje površine betona nakon vremena t izloženosti dejstvu hlorida



PRORAČUNSKI DOKAZ ZA GRANIČNO STANJE DEPASIVIZACIJA ARMATURE USLED PENETRACIJE HLORIDA

Trenutak depasivizacije: $C_{Crit}^d = C^d(x, t)$

$$C_{Crit}^d = C_S^d \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{a^d}{2 \cdot \sqrt{D_{app,C}^d(t) \cdot t}} \right) \right]$$

C_S^d – proračunska vrednost koncentracije hlorida na površini betona

erf – funkcija greške - $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^x e^{-t^2} dt$

a^d – proračunska vrednost debljine zaštitnog sloja

$D_{app,C}^d$ – proračunska vrednost koeficijenta difuzije hlorida

t – vreme izloženosti betona dejstvu hlorida



PRORAČUNSKI DOKAZ ZA GRANIČNO STANJE DEPASIVIZACIJA ARMATURE USLED PENETRACIJE HLOORIDA

$$\frac{C_{Crit}^c}{\gamma_{C_{Crit}}} = (C_S^c \cdot \gamma_{C_S}) \cdot \left[1 - erf \left(\frac{a_{nom} - \Delta a}{2 \cdot \sqrt{k_e^c \cdot D_{RCM,0}^c \cdot k_t^c \cdot \left(\frac{t_0}{t} \right)^a \cdot \gamma_D \cdot t}} \right) \right]$$



$$a_{nom} = erf^{-1} \left(1 - \frac{C_{Crit}^c}{\gamma_{C_{Crit}}} \cdot \frac{1}{C_S^c \cdot \gamma_{C_S}} \right) \cdot 2 \cdot \sqrt{k_e^c \cdot D_{RCM,0}^c \cdot k_t^c \cdot \left(\frac{t_0}{t} \right)^a \cdot \gamma_D \cdot t} + \Delta a$$



PRORAČUNSKI DOKAZ ZA GRANIČNO STANJE DEPASIVIZACIJA ARMATURE USLED PENETRACIJE HLOORIDA

$$\frac{C_{Crit}^c}{\gamma_{C_{Crit}}} = (C_S^c \cdot \gamma_{C_S}) \cdot \left[1 - erf \left(\frac{a_{nom} - \Delta a}{2 \cdot \sqrt{k_e^c \cdot D_{RCM,0}^c \cdot k_t^c \cdot \left(\frac{t_0}{t} \right)^a \cdot \gamma_D \cdot t}} \right) \right]$$



$$t = \left[\left(\frac{2}{a_{nom} - \Delta a} \cdot erf^{-1} \left(1 - \frac{C_{Crit}^c}{\gamma_{C_{Crit}}} \cdot \frac{1}{C_S^c \cdot \gamma_{C_S}} \right) \right)^{-2} \cdot \frac{1}{k_e^c \cdot D_{RCM,0}^c \cdot k_t^c \cdot \left(\frac{t_0}{t} \right)^a \cdot \gamma_D} \right]^{\frac{1}{1-n}}$$



BROJNI PRIMER_2

- AB stubovi mosta preko vodene prepreke (mora)
- Zahtevana pouzdanost: $\beta=2,3$
- Metoda parcijalnih koeficijenata sigurnosti
- $T=100$ god
- Debljina zaštitnog sloja?



BROJNI PRIMER_2

- Ključni parametri:
 - Površinska koncentracija hlorida
 - Koeficijent difuzije hlorida
 - Kritični sadržaj hlorida
- Indeks pouzdanosti: $\beta=2,3$  koeficijenti sigurnosti
- “potopljena zona” : $\Delta x=0$
- Inicijalna količina hlorida u betonu: $C_0=0$

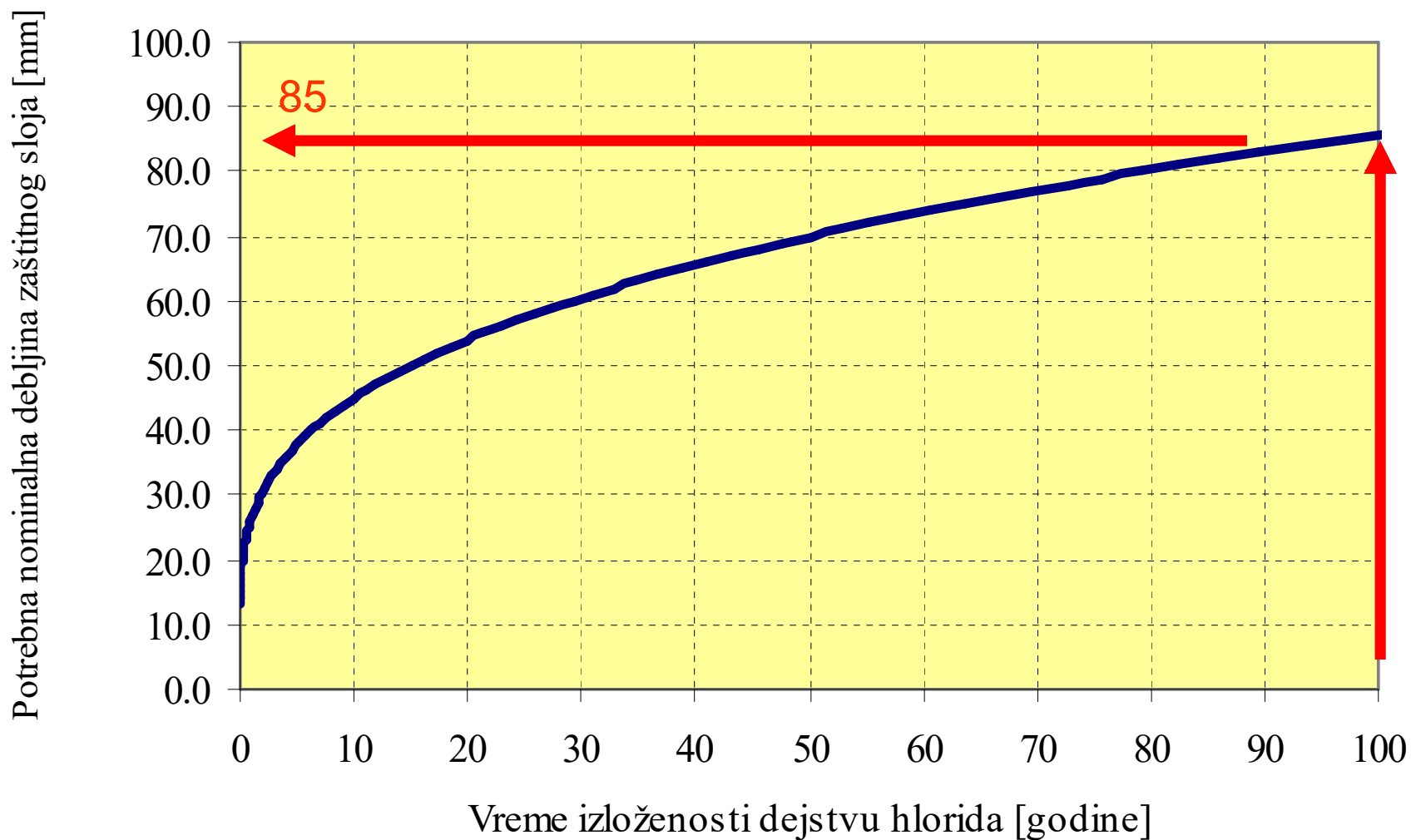


BROJNI PRIMER_2

Parametar		Jedinica	Ulazni podatak
C_{crit}^d	C_{cr}	[tež.%/beton]	0.9
	γ_{Ccrit}	[-]	1.05
C_S^d	C_S	[tež.~/beton]	2.33
	γ_{Cs}	[-]	1.35
$k_{e,d}$	T_{ref}	[K]	293
	T_{real}	[K]	298
	b_e	[-]	4800
$k_{t,d}$		[-]	0.85
$A(t)$	t_0	[god]	0.0767
	a	[-]	0.3
γ_D		[-]	2.2
$D_{RCM,0}$		[m ² /s]	79
a_d	a_{nom}	[mm]	?
	Δa	[mm]	12



BROJNI PRIMER_2



BROJNI PRIMER_1

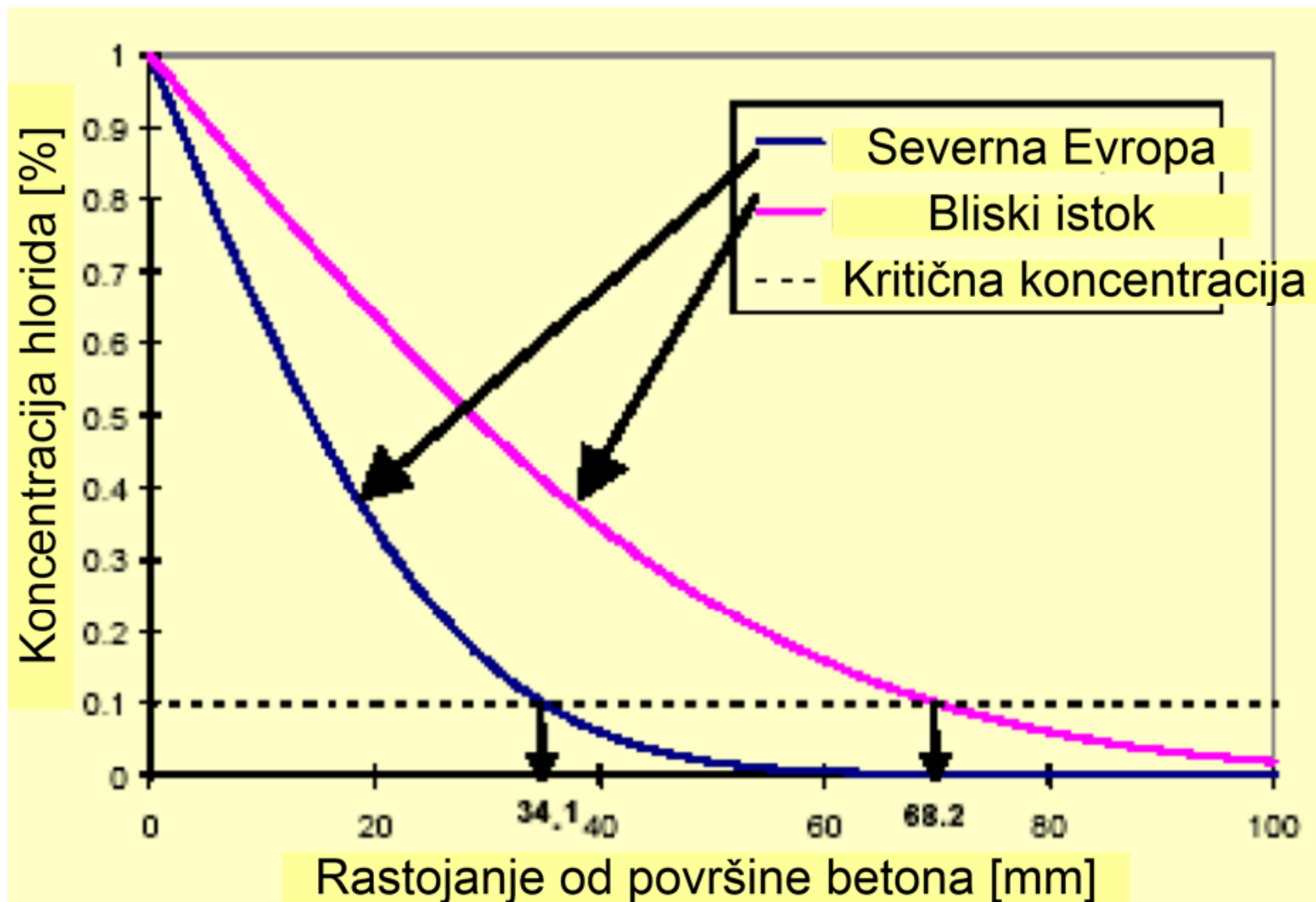
- Debljina zaštitnog sloja prema BAB 87?
- Minimalna debljina: $a_0 = 2,0 \text{ cm}$
- "jako" agresivna sredina: $+1,5 \text{ cm}$
- "površina elementa teško dostupna kontroli": $+0,5 \text{ cm}$
- Klizajuća oplata: $+1,0 \text{ cm}$

- $a = 2,0 + 1,5 + 0,5 + 1,0 = 5,0 \text{ cm}$

- Upotrebni vek?



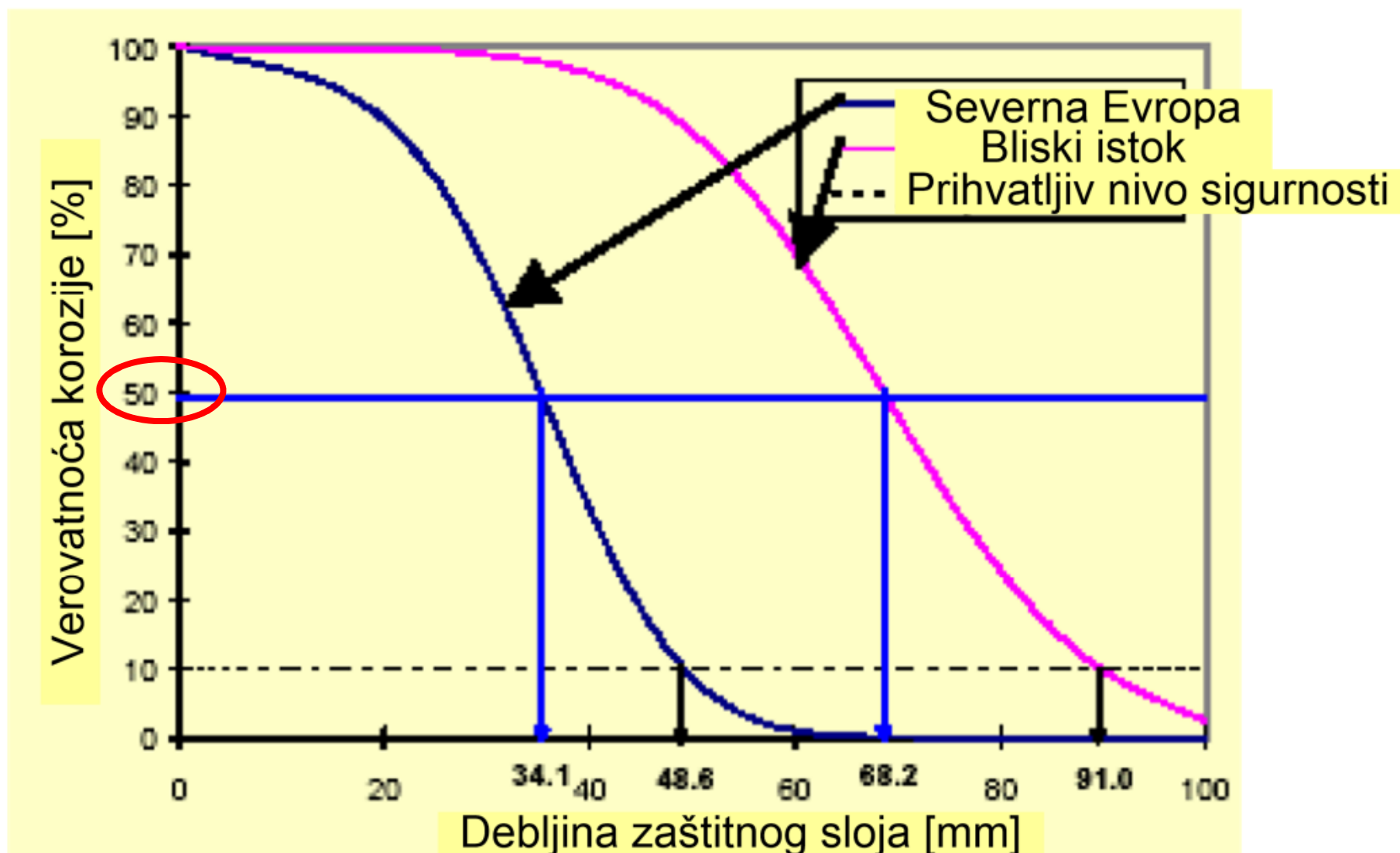
UMESTO ZAKLJUČKA



DETERMINISTIČKI PRISTUP TRAJNOSTI

Sanacije, rekonstrukcije i održavanje betonskih konstrukcija

UMESTO ZAKLJUČKA



PROBABILISTIČKI PRISTUP TRAJNOSTI

