



Универзитет у Београду – Грађевински факултет
www.grf.bg.ac.rs

Студијски програм:	ГРАЂЕВИНАРСТВО ДИПЛОМСКЕ АКАДЕМСКЕ СТУДИЈЕ
Modul:	КОНСТРУКЦИЈЕ
Година/Семестар:	I година / I семестар
Назив предмета (шифра):	БЕТОНСКИ МОСТОВИ (МЗК2БМ и МОК1БМ)
Наставник :	В. Проф. Др Снежана Машовић В. Проф. Др Иван Игњатовић
Наслов предавања:	Поузданост, материјали и оптерећења
Датум :	24.11.2025.

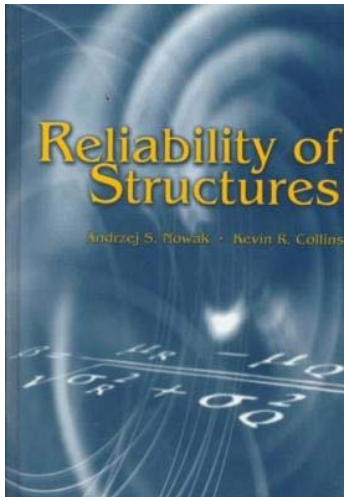
Поузданост у грађевинском конструкторству

'Structural engineering is the art of moulding materials we do not really understand into shapes we can not really analyze so as to withstand forces we can not really assess in such a way that the public does not really suspect.'

E. H. Brown, Imperial College London 1967.

ЛИТЕРАТУРА

Теорија поузданости



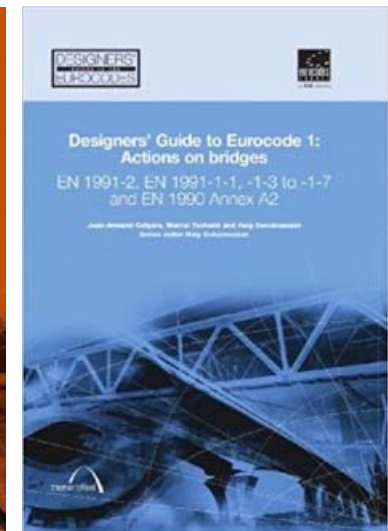
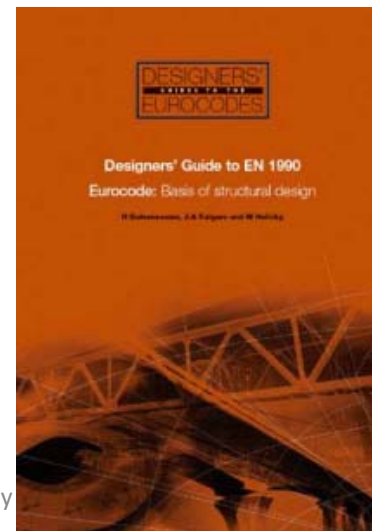
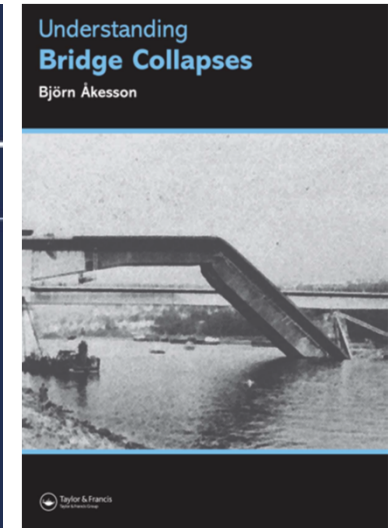
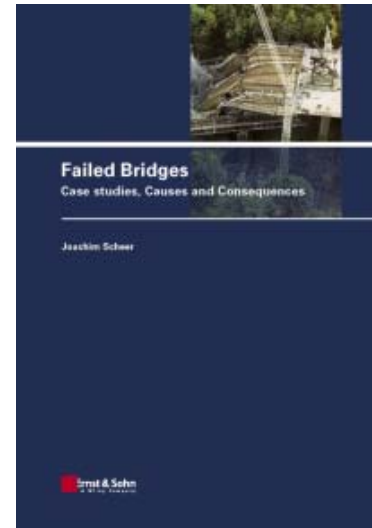
Risk and Safety in Engineering



Lecture Notes
Prof. Dr. M.H.Faber
2009

ETH
Engineering Technology Institute for
Sustainable Infrastructure of Technology Zurich

Истраге, кодови, приручници и смернице



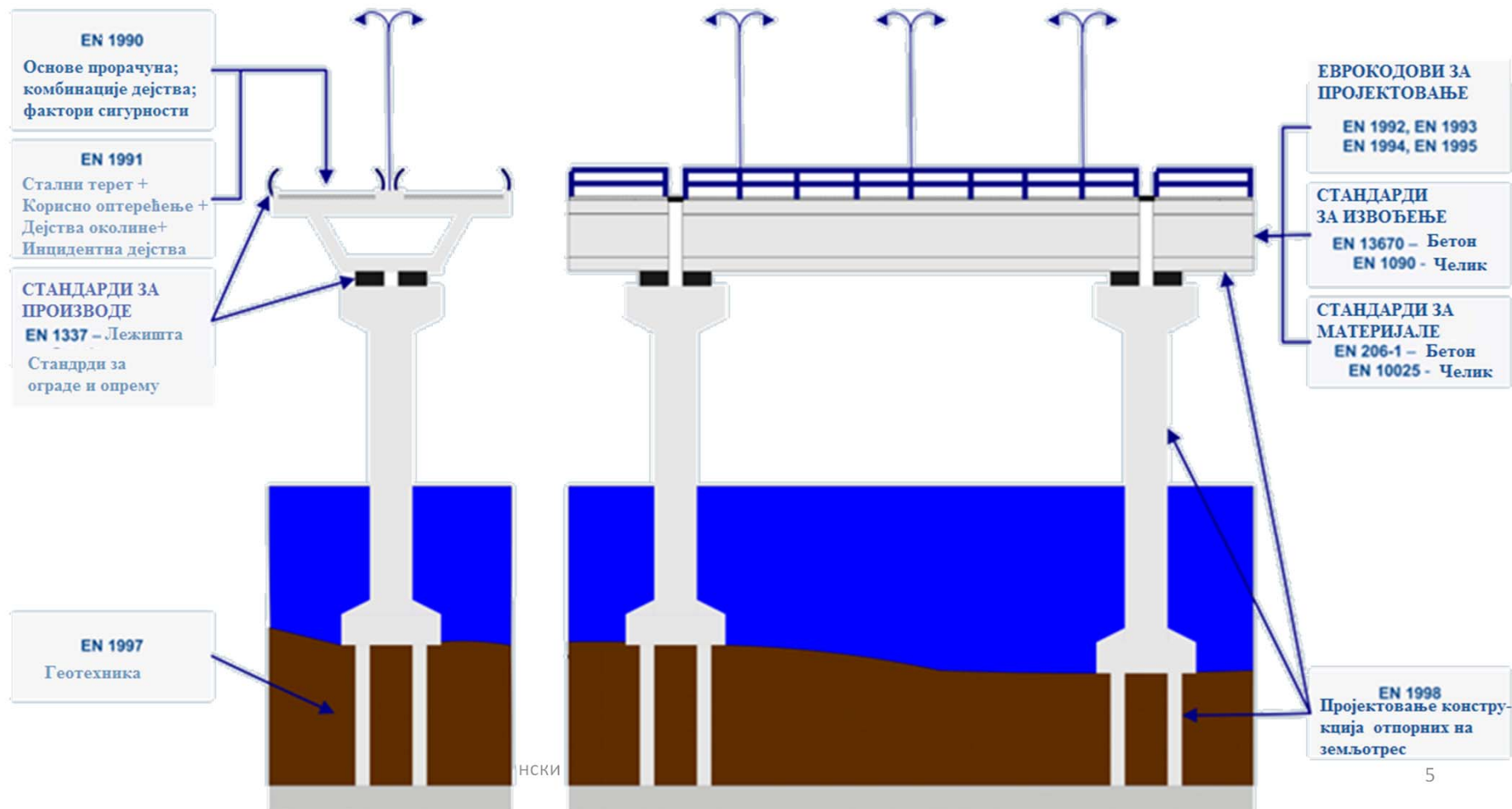
*Специјализована литература намењена више процени постојећих конструкција него пројектовању нових;
Увид у калибрацију фактора сигурности.*

Докторске студије

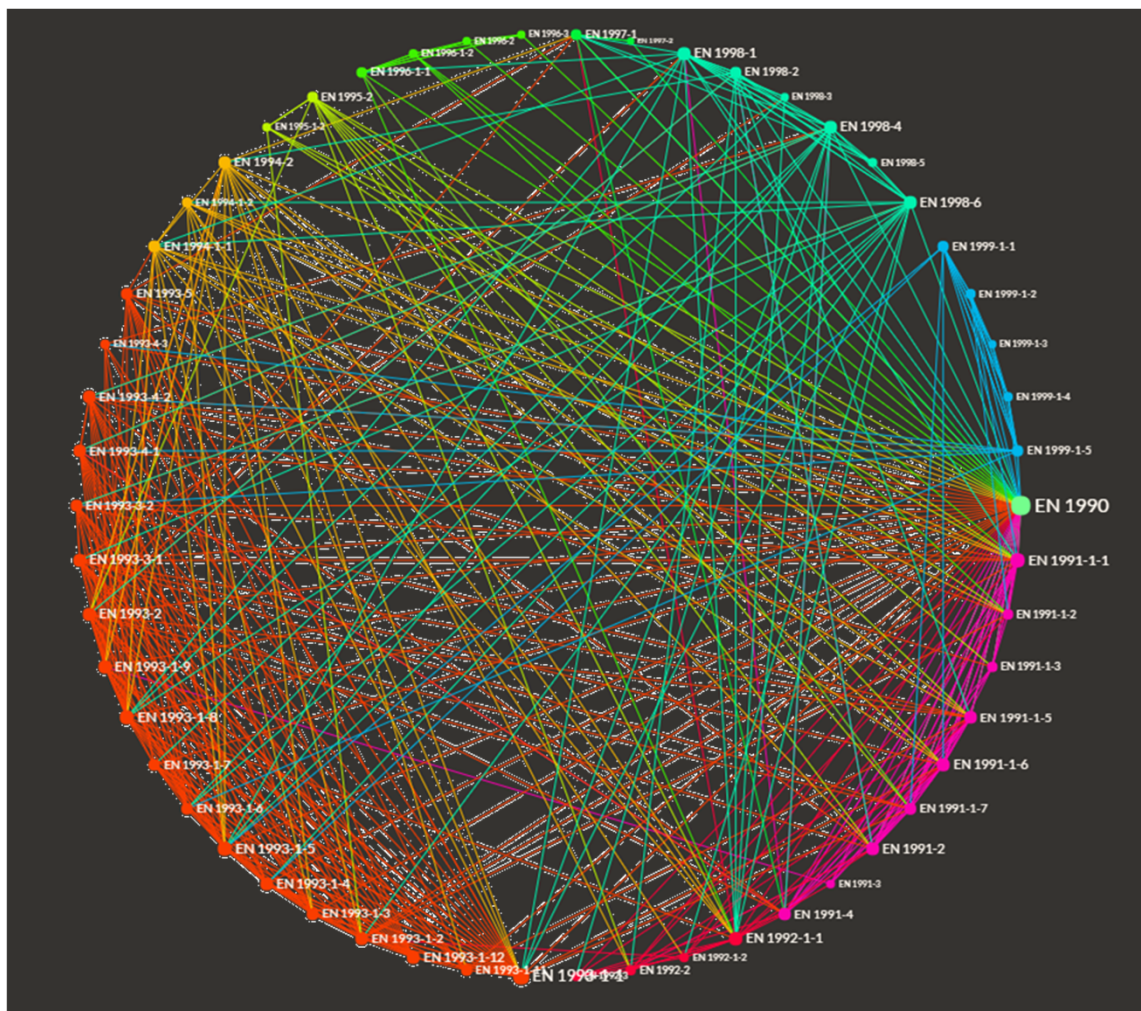
Грађевински факултет Универзитета у



Еврокодови



Али...



Грађевински факултет Универзитета у Београду, 2024.



Осавремењавање прописа



Tay bridge 1879.



Tacoma Narrows 1940.

<https://www.youtube.com/watch?v=XggxeuFDaDU>



“Silver Bridge” 1967.



Almö bridge -1980

Грађевински факултет Универзитета у Београду, 2024.



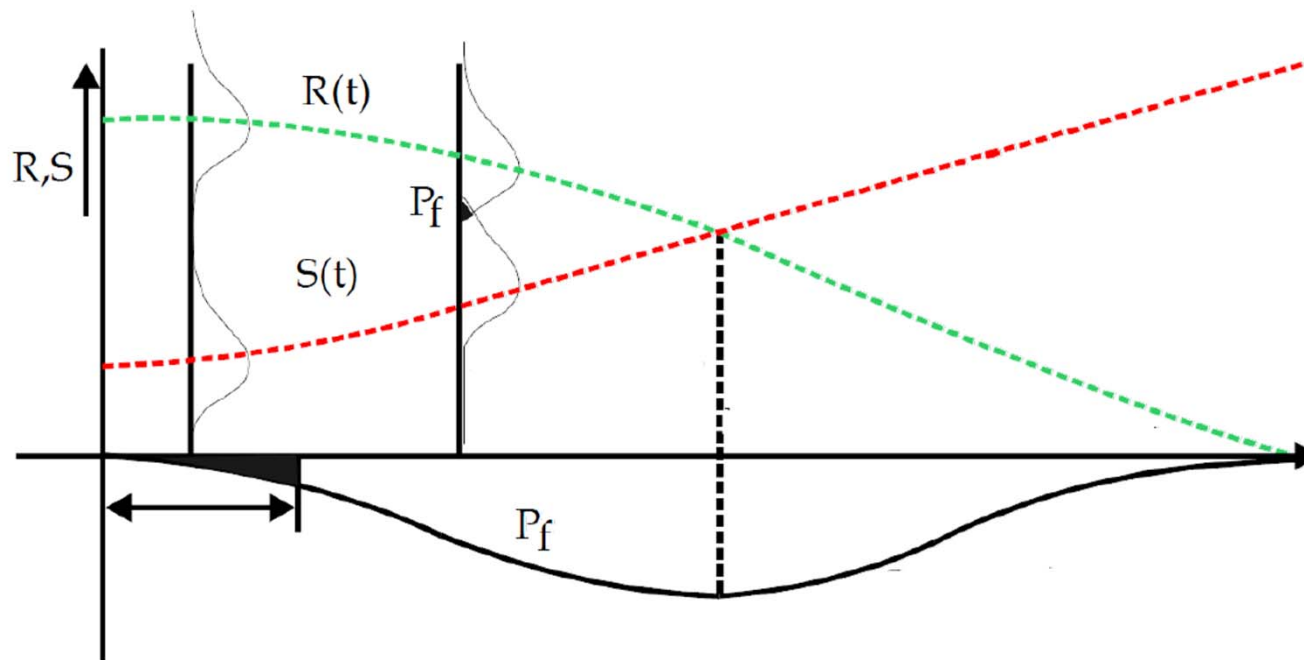
London Millennium Footbridge - 2000

https://www.youtube.com/watch?v=eAXVa__XWZ8

ПОУЗДАНОСТ И КОНЦЕПТ ГРАНИЧНИХ СТАЊА

- Поузданост је способност конструкције да има одговарајућу употребљивост уз предвиђену сигурност (носивост) и претпостављену трајност. (JUS.U. C7.010 – 1987)
- Конструкције се пројектују и изводе тако да током свог радног века, са одговарајућим степеном поузданости и на економичан начин :
 - прихвате сва оптерећења и утицаје којима могу да буду изложене;
 - буду погодне за употребу за коју су пројектоване.
- Поузданост је појам комплементаран (супротан) отказу (failure) конструкције.
 - Шта је ”отказ” конструкције ?
- Под отказом се подразумева надилажење неког граничног стања (конструкција више не испуњава постављене захтеве):
 - Носивости:
 - ✦ Безбедност људи, објекта и садржаја
 - Употребљивости:
 - ✦ Функционисање, удобност и изглед објекта
- Савремени прописи прописују вероватноћу отказа (достизања граничног стања) P_f зависно од типа граничног стања (ULS/SLS).
- ✓ Сматра се да је овај захтев испуњен уколико су конструкције пројектоване према прописима који су урађени на основу калибрисаних парцијалних фактора сигурности (семипробабистички приступ).

Кратак осврт на теорију поузданости

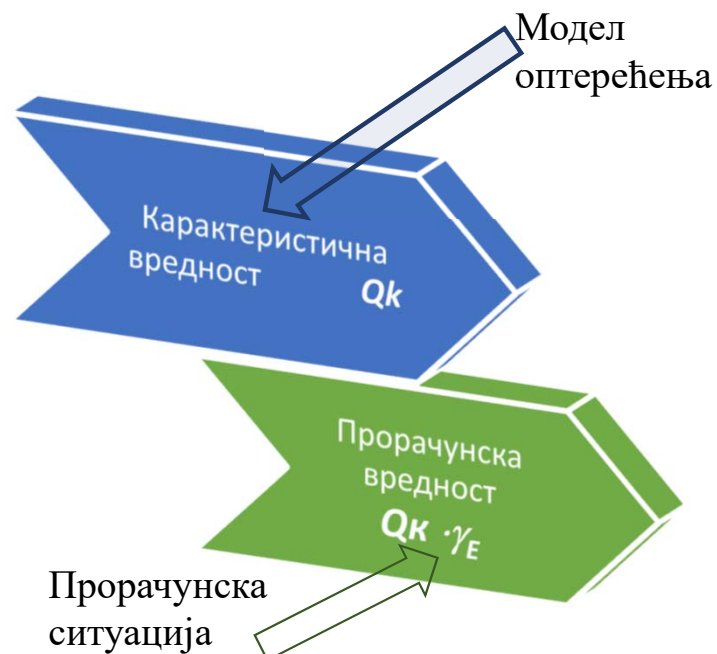
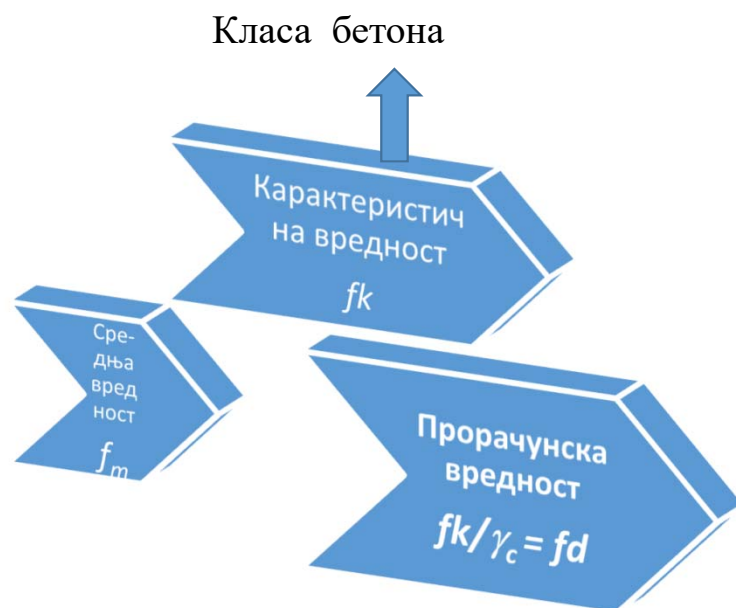


Примена теорије поузданости у грађевинском конструкторству

- SRPS EN 1990:2012 Еврокод – Основе прорачуна конструкција
 - SRPS EN 1990/NA:2012
 - ✦ Објекти категорије 5 (100 год.):
 - Инжењерски грађевински објекти на државним путевима првог и другог реда, друмски мостови на регионалним путевима.
 - Инжењерски грађевински објекти јавне железничке инфраструктуре са прикључцима и метроом.
- SRPS EN 1992-1-1:2015 Еврокод 2 — Пројектовање бетонских конструкција — Део 1-1: Општа правила и правила за зграде
 - SRPS EN 1992-1-1/NA:2015
- SRPS EN 1992-2:2014 Еврокод 2 — Пројектовање бетонских конструкција — Бетонски мостови — Правила пројектовања и конструисања (објављен на српском 2020.)
- SRPS EN 1992-2/NA:2015 Еврокод 2 — Пројектовање бетонских конструкција — Бетонски мостови — Правила пројектовања и конструисања — Национални прилог (уз додатак од 7 страна објављен 2020.)

Парцијални фактори сигурности

- За материјале (и модел материјала)
- За оптерећења и модел оптерећења као и прорачунски ефекат дејстава



МАТЕРИЈАЛИ



Грађевински факултет Универзитета у Београду, 2024.

Бетон као материјал за извођење мостова

Предности:

- Релативно велика чврстоћа на притисак,
- Мали захтеви у погледу обучености радне снаге,
- Готово неограничена могућност обликовања моста,
- Сразмерно ниска цена,
- Тајност (заблуде о непотребном одржавању – угроженост корозијом арматуре и другим процесима)

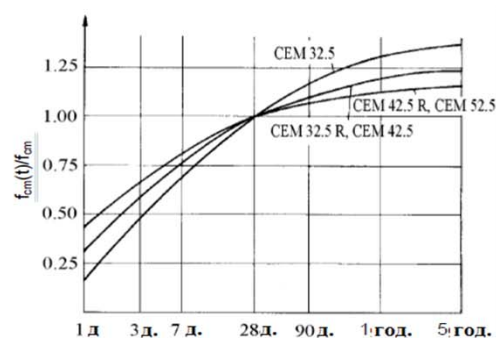
Бетонска мешавина

- Конгломерат (вештачки камен)
 - Цементна паста (везиво)
 - ✦ По правилу нормални Портланд цемент (CEM I 42.5) $Cl < 4.5\%$
 $SO_4 < 0.1\%$
 - ✦ Вода без хлорида и сулфата (пијућа вода)
 - ✦ Значај водоцементног фактора
 - Агрегат (шљунак и песак)
 - ✦ Петрохемијски састав (избегавати агрегат који има лискуна)
 - ✦ Гранулометријска крива
 - ✦ Речни шљунак
 - Адитиви
- Топлота хидратације

Чврстоћа на притисак и њен прираст током времена

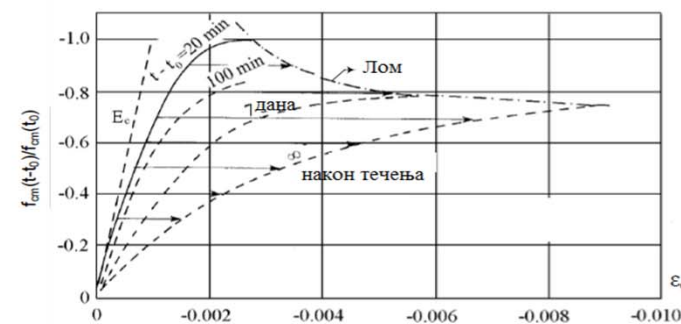


$$f_{ck} \approx 0.8 f_{ck, cube}$$



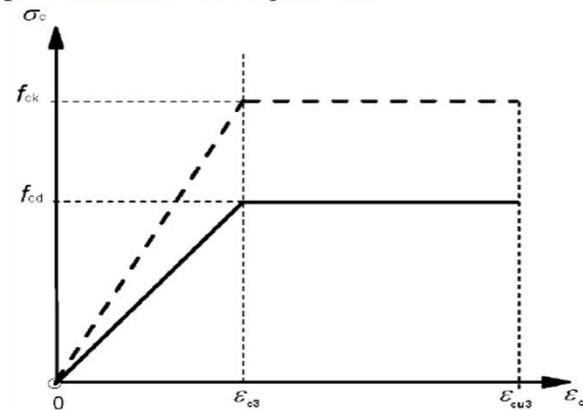
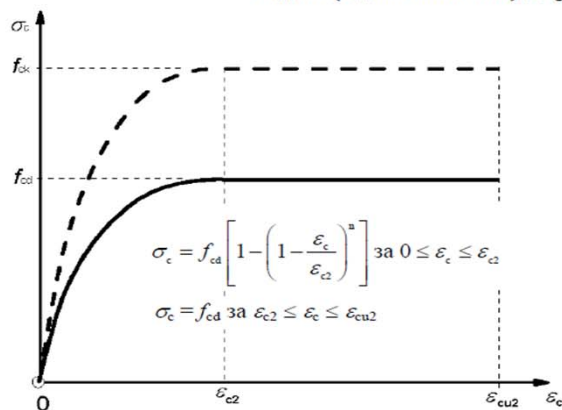
Развој чврстоће на притисак током времена

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) f_{cm} \quad \beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{0.5} \right] \right\}$$

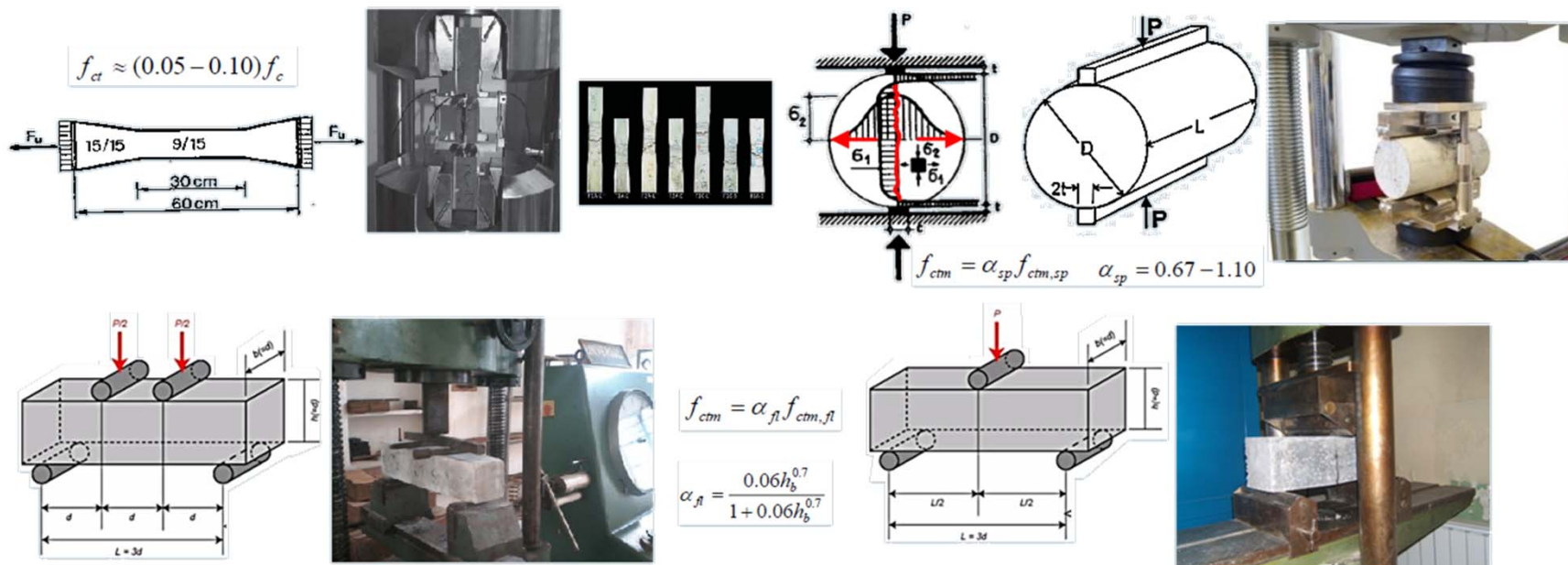


Зависност чврстоће бетона од брзине наношења оптерећења

Радни (идеализовани) дијаграми напон дилатација бетона



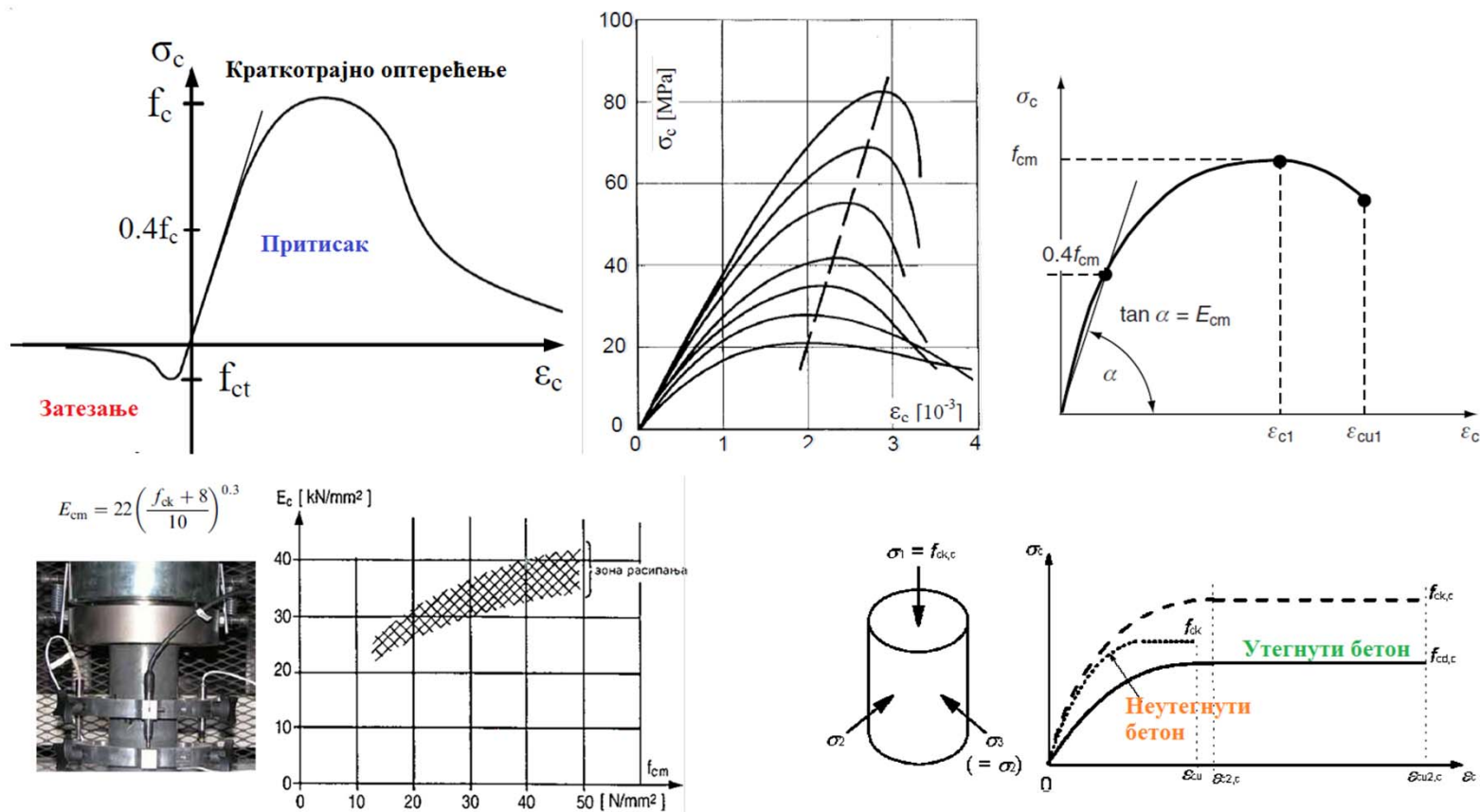
Чврстоћа на затезање



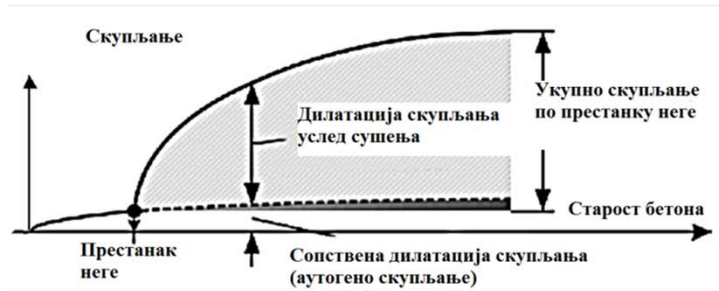
Примењује се:

При одређивању минималне арматуре, дужина сидрења и преклапања, смицања, отвора прслина, екстерно претходно напрегнутих елемената и контроли кртог лома претходно напрегнутих елемената.

Деформацијске карактеристике



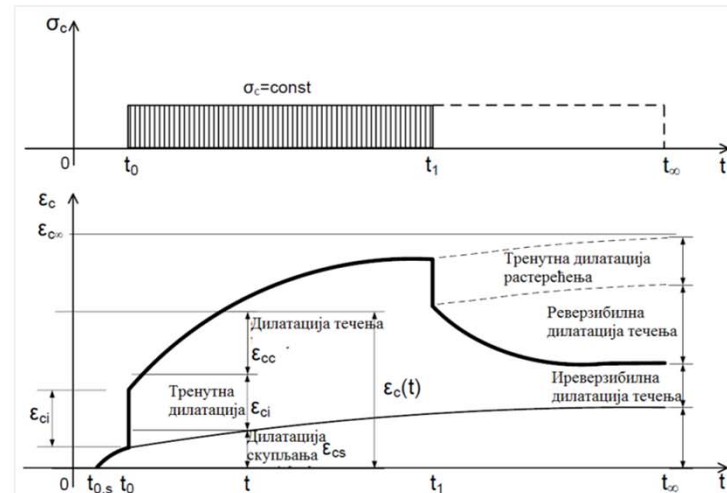
Скупљање и течење



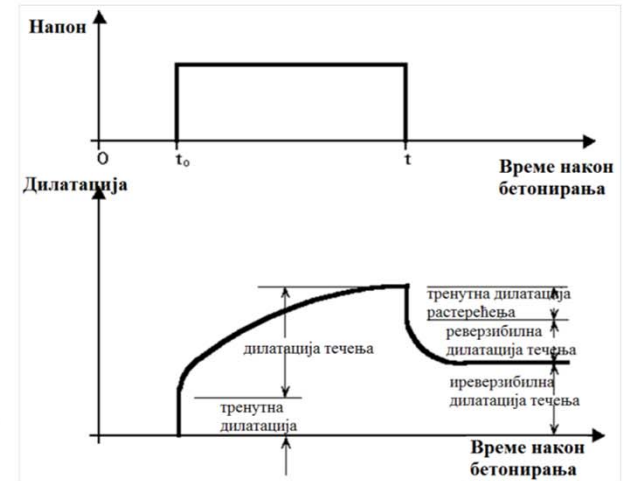
Промена модула еластичности током времена !!

$$E_{cl}(t) = \beta_E(t) E_{cl}$$

$$\beta_E(t) = [\beta_{cc}(t)]^{0.5}$$

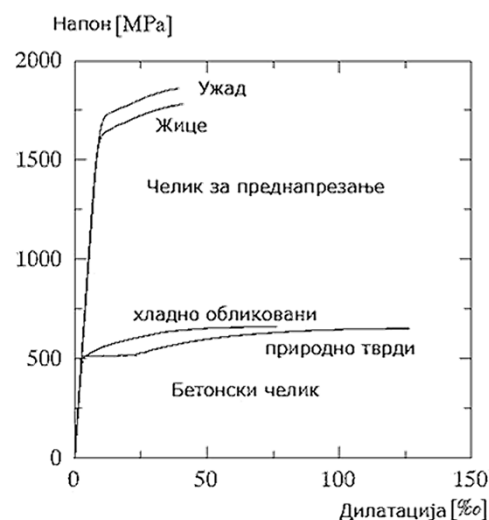


Грађевински факултет Универзитета у Београду, 2024.

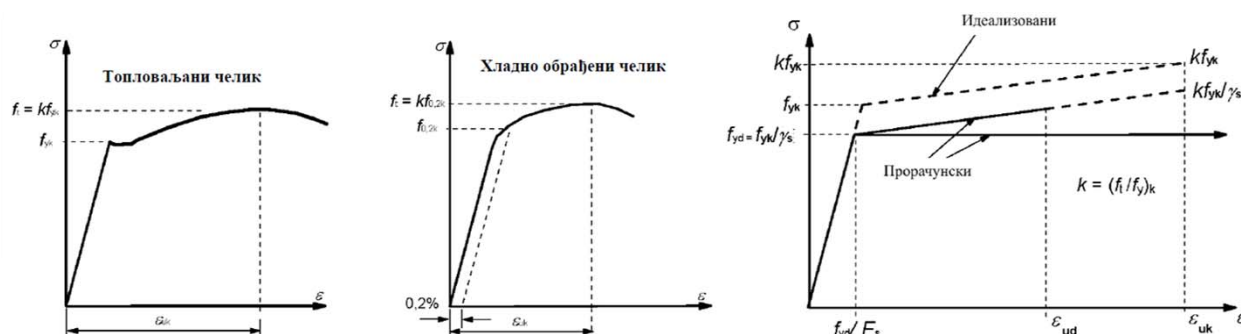


Карактеристике арматуре - чврстоћа

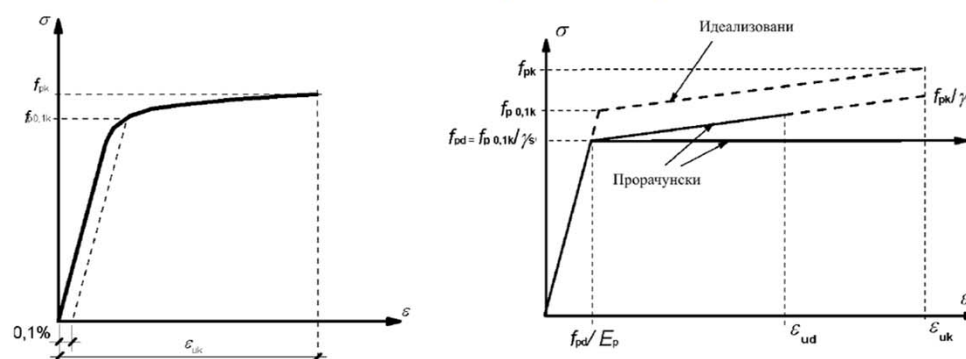
- A: $(f_t / f_y)_k \geq 1.05$ $\varepsilon_{uk} \geq 2.5\%$
- B: $(f_t / f_y)_k \geq 1.08$ $\varepsilon_{uk} \geq 5.0\%$
- C: $1.35 \geq (f_t / f_y)_k \geq 1.15$ $\varepsilon_{uk} \geq 7.5\%$
- D: $1.45 \geq (f_t / f_y)_k \geq 1.25$ $\varepsilon_{uk} \geq 8.0\%$



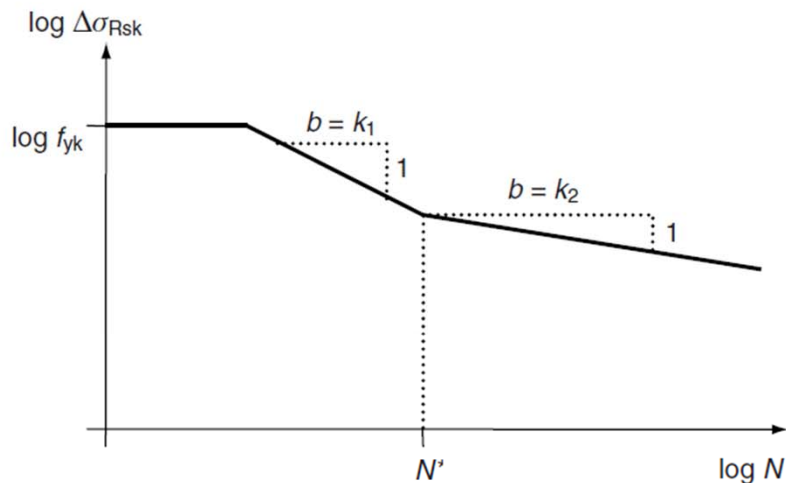
1 - Меки бетонски челик



2 - Челик за претходно напрезање



Чврстоћа на замор



Параметри за S-N криве за арматуру

Врста арматуре	N^*	експонент напона		$\Delta\sigma_{Rsk}$ [МПа] после N^* циклуса
		k_1	k_2	
Праве и савијене шипке ¹	10^6	5	9	162,5
Заварене шипке и арматурне мреже	10^7	3	5	58,5
Уређаји за настављање (наставци)	10^7	3	5	35

НАПОМЕНА 1 Вредности за $\Delta\sigma_{Rsk}$ су вредности за праве шипке. Вредности за савијене шипке треба да се добију коришћењем редукционог коефицијента $\zeta = 0,35 + 0,026 D/\phi$ где је:

D пречник ваљка око којег је шипка савијена;

ϕ пречник шипке.

Параметри за S-N криве за челик за претходно напрезање

S-N крива за челик за претходно напрезање који се користи за	N^*	експонент за напоне		$\Delta\sigma_{Rsk}$ [МПа] после N^* циклуса
		k_1	k_2	
претходно затезање	10^6	5	9	185
накнадно затезање				
– појединачна ужад у пластичним цевима	10^6	5	9	185
– прави каблови или закривљени каблови у пластичним цевима	10^6	5	10	150
– закривљени каблови у челичним цевима	10^6	5	7	120
– уређаји за настављање	10^6	5	5	80

Парцијални фактори за материјале (Еврокод)

Прорачунска ситуација	Бетон γ_c	Мека арматура γ_s	Арматура за претходно напрезање $\gamma_{s,p}$
Носивости (Р/Т) и замора	1.5	1.15	1.15
Инцидентна	1.2	1.0	1.0
Употребљивости	1.0	1.0	1.0

Трајност

Узроци пропадања бетонских мостова

Алкално агрегатна реакција



Мржњење и крављење



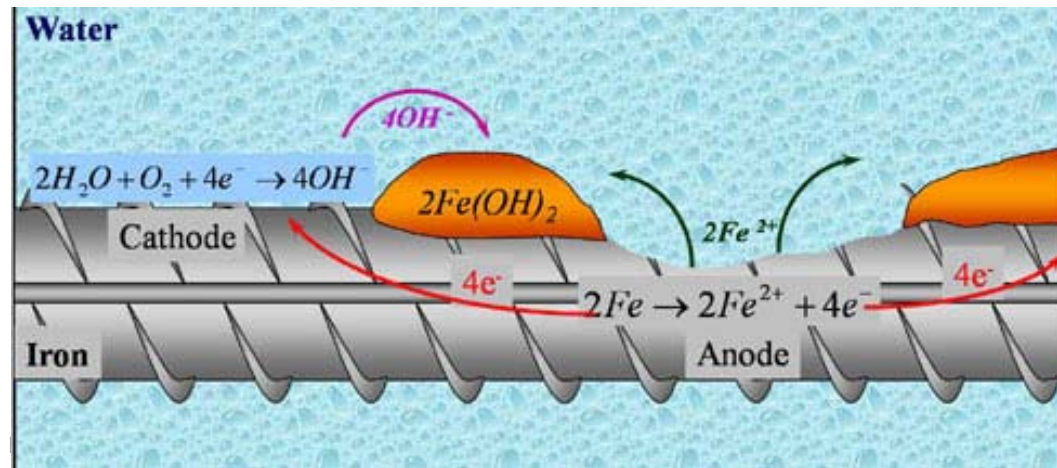
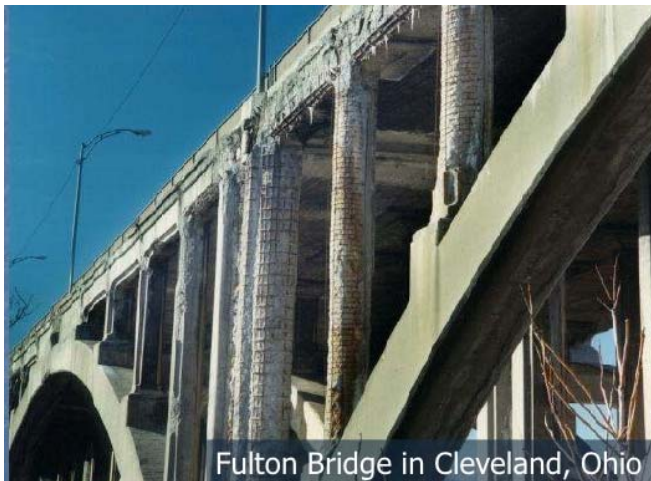
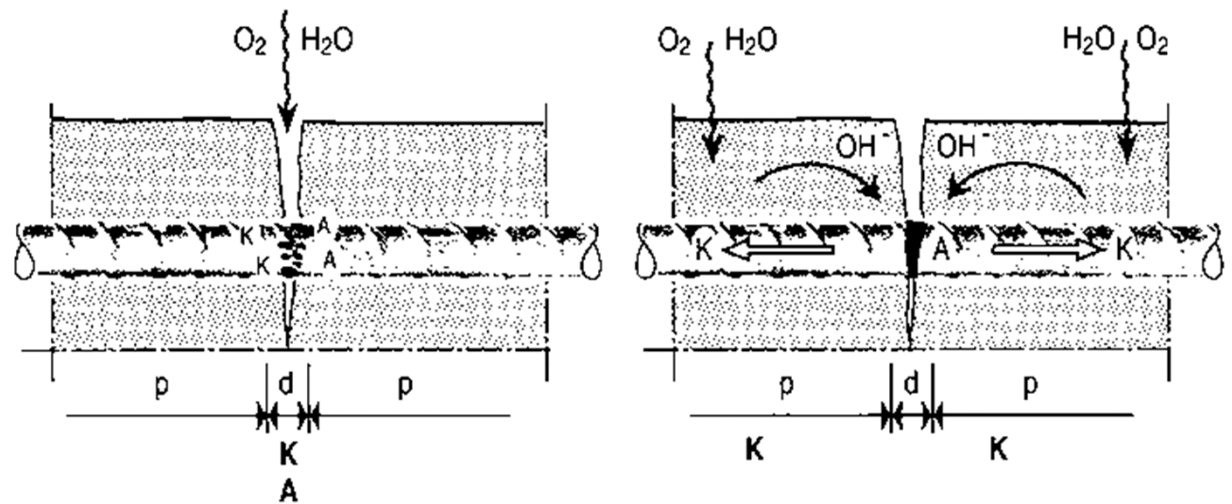
Сулфатна "корозија"



Одложено формирање еtringита



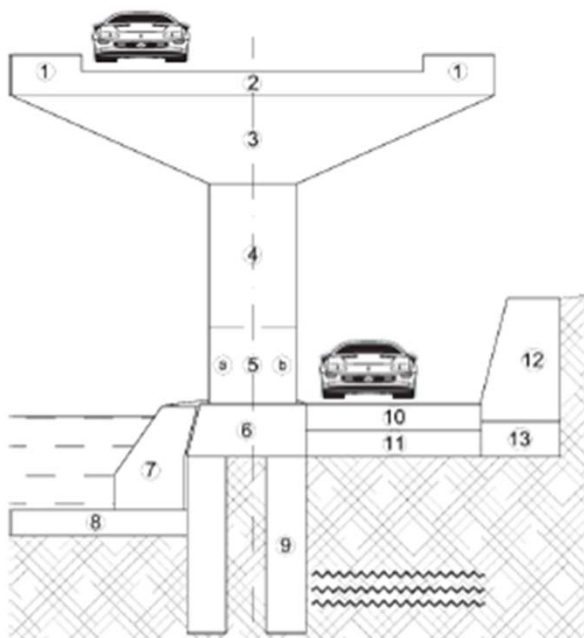
Корозија арматуре



Мере за спречавање пропадања

- Избор састојака бетона:
 - Смањење алкалија у цементу (натријума и калијума)
 - Употреба сулфално отпорних портланд цемента
 - Избор агрегата (избежавати агрегат који садржи силицијум: опал, кварц, калцедон, доломит)
 - Смањење водоцементног фактора
 - Додатци: аеранти, метакаолин, силицијумска прашина, згура
- Физичка заштита конструкције:
 - Одводњавање,
 - Премази и мембране.

Избор класе изложености елемената моста



Ознака	Назив елемента	Класе изложености
1	АБ пешачка/ревиозиона стаза са венцем	XC4, XD3, XF4
2	Коловозна АБ плоча	XC4, XD3, XF4, XM
3	Доњи строј АБ распонске конструкције	XC3, XD1, XF2
4	Стуб	XC4, XF1
5a	Зона дејства аеросола	XC4, XD1, XF2
5b	Зона прскања водом која садржи хлориде	XC4, XD3, XF2
6	Глава шипа	XC2, XF1, XA
7	Елемент изложен променљивом нивоу воде	XC4, XF1, XA
8	АБ плоча канала	XC2, XA
9	Шипови	XC2, XA
10	Неармирана коловозна плоча	XF4, XM
11	Везани носећи слој	X0
12	Потпорни зид (АБ зид)	XC4, XD3, XF2, XA
13	АБ елементи у тлу, испод зоне мржњења	XC2, XA
	АБ елементи у тлу, делимично у зони мржњења	XC2, XF1, XA

XC – карбонатизација, XD – изложеност хлоридима

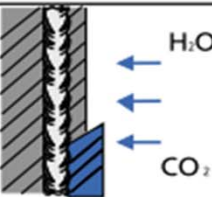
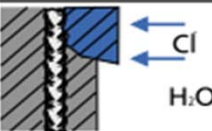
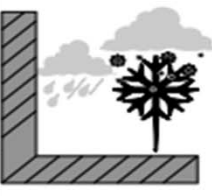
XF – мржњење, XA – хемијска агресија, XM - отпорност на хабање површине бетона(зависи од врсте сабраћајног оптерећења)

Одабир класе чврстоће бетона

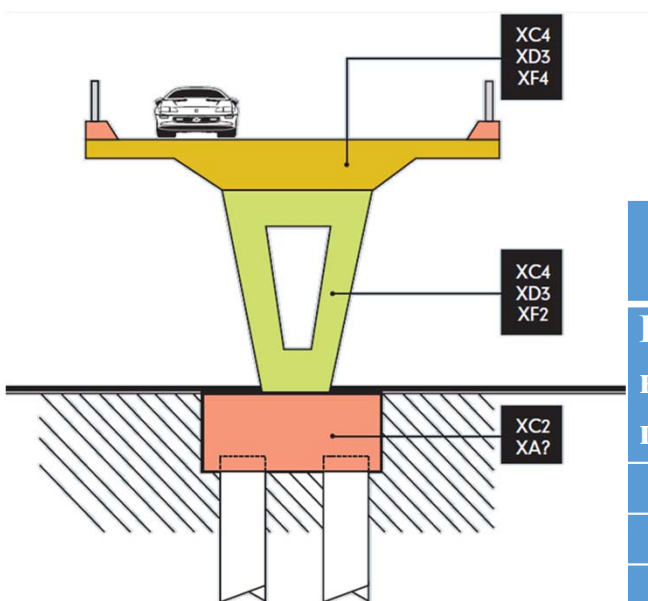
	Корозија услед утицаја карбоната				Корозија услед утицаја хлорида			Корозија услед утицаја хлорида из морске воде		
	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XS1	XS2	XS3
Индикативне најмање класе	C20/25	C25/30	C30/37		C30/37		C35/45	C30/37		C35/45

	Без ризика	Агресивно дејство замрзавања/одмрзавања			Хемијска агресија		
	X0	XF1	XF2	XF3	XA1	XA2	XA3
Индикативна класа чврстоће	C12/15	C30/37	C25/30 ?	C30/37		C30/37	C35/45

Захтеви за квалитет бетона

Klase izloženosti			Zahtevi po pitanju tehnologije betona			
Oznaka klase		Efekat	Sredina	Max. w/c	Min. Cementa [kg/m ³]	f _{ck, cube}
XO		 Bez efekta na beton	Bez dejstva na beton	Bez zahteva	Bez zahteva	C12/15
XC	1	 Karbonatizacija	Suva ili stalno mokra	0.65	260	C20/25
	2		Mokra, retko suva	0.60	280	C25/30
	3		Umereno vlažna	0.55	280	C30/37
	4		Ciklično mokra i suva	0.50	300	C30/37
XD/ XS	1	 Hloridi	Umereno vlažna	0.55/0.50	300	C30/37
	2		Mokra, retko suva	0.55/0.45	300 / 320	C30/37 / C35/45
	3		Ciklično mokra i suva	0.45	320 / 340	C35/45
XF	1	 Smrzavanje-odmrzavanje	Umereno zasićena vodom, bez soli za odleđivanje	0.55	300	C30/37
	2		Umereno zasićena vodom, sa solima za odleđivanje	0.55	300	C25/30
	3		Jako zasićena vodom, bez soli za odleđivanje	0.50	320	C30/37
	4		Jako zasićena vodom, sa solima za odleđivanje	0.45	340	C30/37

Захтеви у погледу заштитног слоја



XC – карбонатизација
 XD – изложеност хлоридима
 XF – мржњење
 XA – хемијска агресија

$$c_{\min} = \max \{ c_{\min, b}; c_{\min, \text{dur}} + \Delta c_{\text{dur}, \gamma} - \Delta c_{\text{dur}, \text{st}} - \Delta c_{\text{dur}, \text{add}}; 10 \text{mm} \}$$

Захтеви за $c_{\min, \text{dur}}$ с обзиром на услове средине (mm) за челик за армирање/челик за претходно напрезање

Класа конструкције	Класе изложености						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
S4	10/10	15/25	25/35	30/40	35/45	40/50	45/55
S5	15/15	20/30	30/40	35/45	40/50	45/55	50/60
S6	20/20	25/35	35/45	40/50	45/55	50/60	55/65

Резиме – фактори који утичу на пропадање бетонских мостова

- Материјали:

- Ниска чврстоћа бетона;
- Висок водо-цементни фактор;
- Цемент са великим садржајем алкалија;
- Реактивни агрегат;
- Адитиви који садрже CaCl_2 .

- Извођење:

- Лоша уградња;
- Рана појава прслина (лоша нега);
- Лоше изведен заштитни слој.

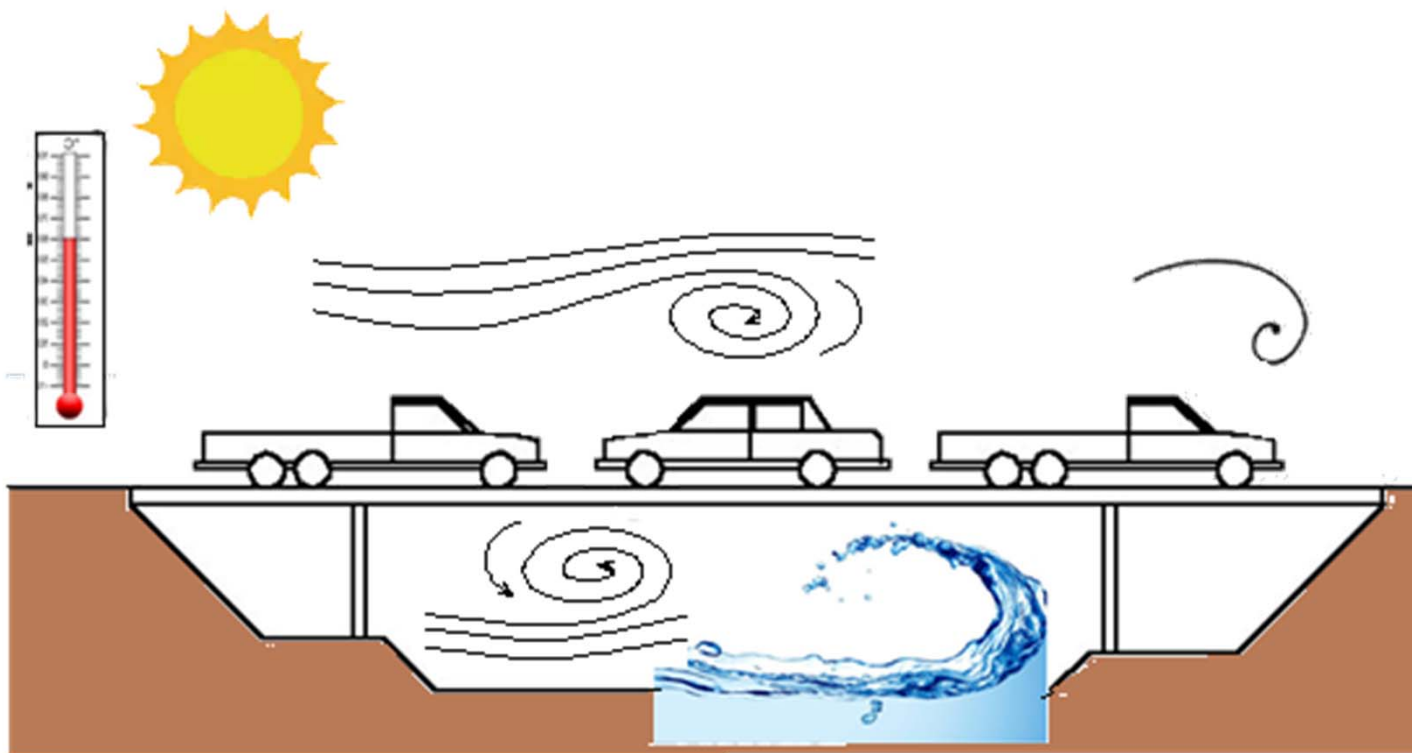
- Пројекат:

- Лоше решено одводњавање;
- Густа арматура (недовољно простора);
- Лоше решени спојеви;
- Лоша бетонска мешавина
- Недоступна места у конструкцији.

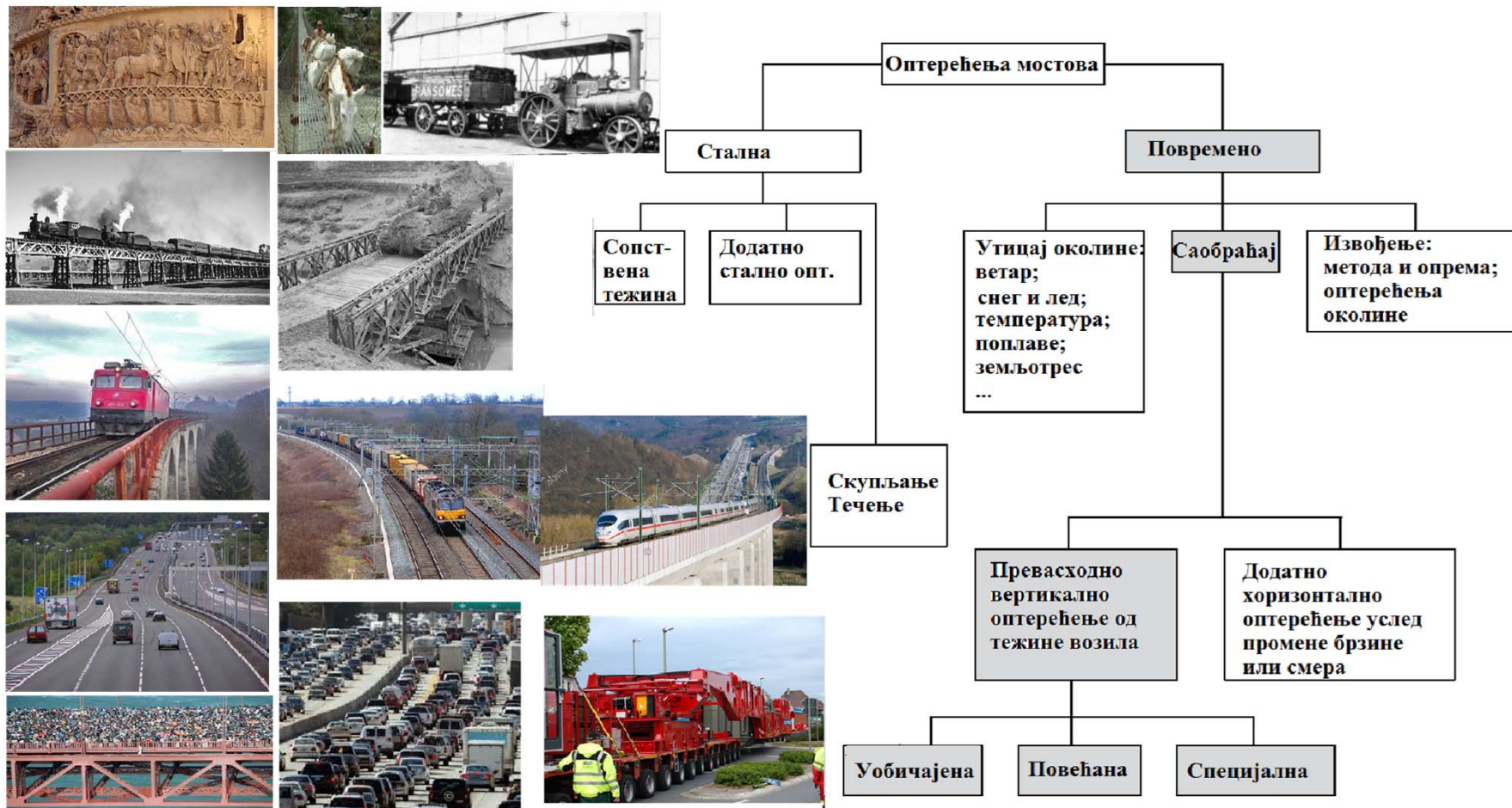
- Утицај средине:

- Хлориди;
- Карбонатизација;
- Сулфати;
- Вода.

ОПТЕРЕЋЕЊА



Оптерећења мостова



Прописи и правилници

- EN 1991:
 - EN 1991-1-1 - Еврокод 1 — Дејства на конструкције — Део 1-1: Општа дејства — Запреминске тежине, сопствена тежина, корисна оптерећења за зграде;
 - EN 1991-1-3 - Еврокод 1 — Дејства на конструкције — Део 1-3: Општа дејства — Оптерећења снегом
 - EN 1991-1-4 -Еврокод 1 — Дејства на конструкције — Део 1-4: Општа дејства — Дејства ветра
 - EN 1991-1-5 -Еврокод 1 — Дејства на конструкције — Део 1-5: Општа дејства — Топлотна дејства
 - EN 1991-1-6 - Еврокод 1 - Дејства на конструкције - Део 1-6: Општа дејства - Дејства током извођења
 - EN 1991-1-7 -Еврокод 1 - Дејства на конструкције - Део 1-7: Општа дејства - Инцидентна дејства
- EN **1991-2** - Еврокод 1: Дејства на конструкције - Део 2: Саобраћајно оптерећење на мостовима

Прорачунске ситуације и комбинације дејстава Еврокод 1990

Гранична стања носивост (EN1990 Annex A2)

Про- рачунска ситуација	Ознака	Прорачунска вредност дејства
Стална / пролазна	R/T	$E_d = E_d \left[\sum_j (\gamma_{G,j} \cdot G_{k,j}) + \gamma_p \cdot P_k + \gamma_Q \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} (\gamma_Q \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}) \right]$
Инциде- нтна	I	$E_d = E_d \left[\sum_j (\gamma_{G,j} \cdot G_{k,j}) + \gamma_p \cdot P_k + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} (\psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}) + A_d \right]$
Сеизмичка	E	$E_d = E_d \left[\sum_{j \geq 1} G_{K,j} + P + A_{sd} + \sum_{i \geq 1} \psi_{0,2} \cdot Q_{K,i} \right]$

Гранична стања употребљивости

Про- рачунска комбинација	Контрола	Прорачунска вредност дејства
Карактеристи- чна	Напо- на	$E_d = E_d \left[\sum_j (G_{k,j}) + P_k + Q_{k,1} + \sum_{i>1} (\psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}) \right]$
Честа	ПН - Прсли- не	$E_d = E_d \left[\sum_j (G_{k,j}) + P_k + \Psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} (\psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}) \right]$
Квазистална	Дефо- рмације АБ – прсли- не	$E_d = E_d \left[\sum_j (G_{k,j}) + P_k + \sum_{i=1} (\psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}) \right]$

Ефекти скупљања, претходног напрезања и замора

	ГСН Неповољно	ГСН Повољно	ГСУ Неповољно	ГСУ Повољно	Замор
Скупљање	1.0	0	1.0	0	1.0/0
ПН – глобални ефекти	1.1 Стабилност при екстерном ПН	1.0	1.0	1.0	1.0
ПН -локални ефекти	1.2 Анкерне зоне	1.0	1.0	1.0	1.0
Оптерећење замора	-	-	-	-	1.0

$$\left(\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \right) + Q_{fat}$$

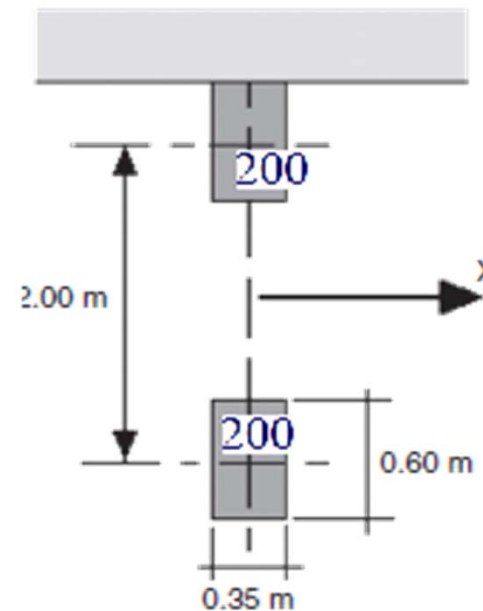
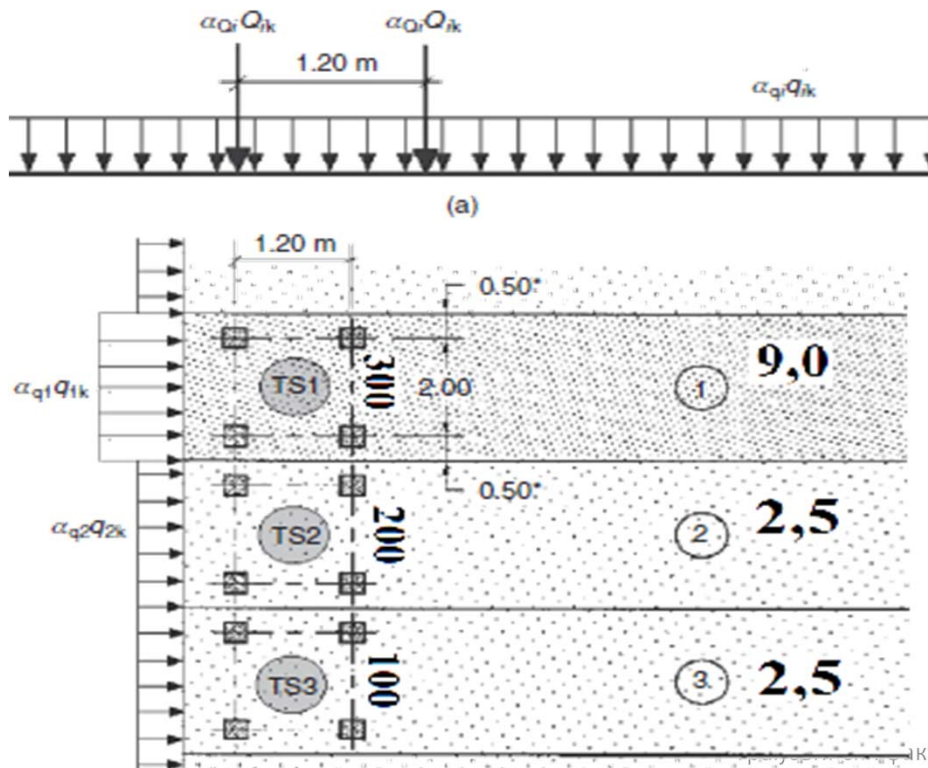
Саобраћајна оптерећења друмских мостова

4 модела и 6 група оптерећења

5 модела за контролу замора

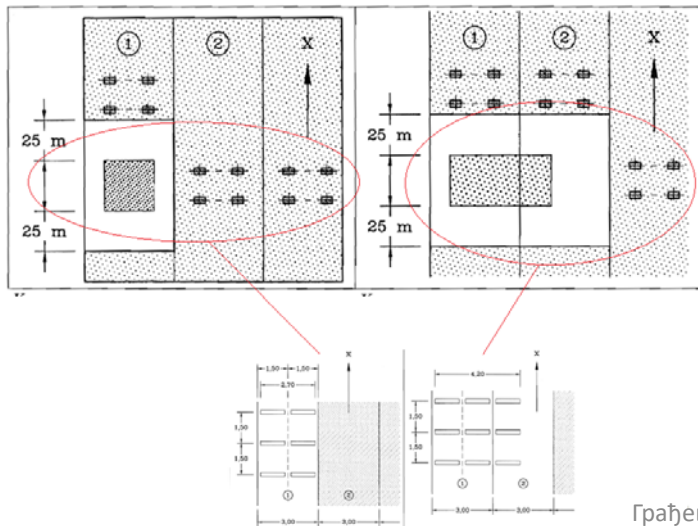
LM1 за глобалну анализу

LM2 за локалну анализу



као упрошћење могу да се користе димензије контактне површине точка као код LM1 (0,40x0,40 m)

Оптерећење LM 3 и LM 4

 5 kN/m^2 .

Хоризонтална дејства услед друмског саобраћаја

Подужна (покретање и кочење)

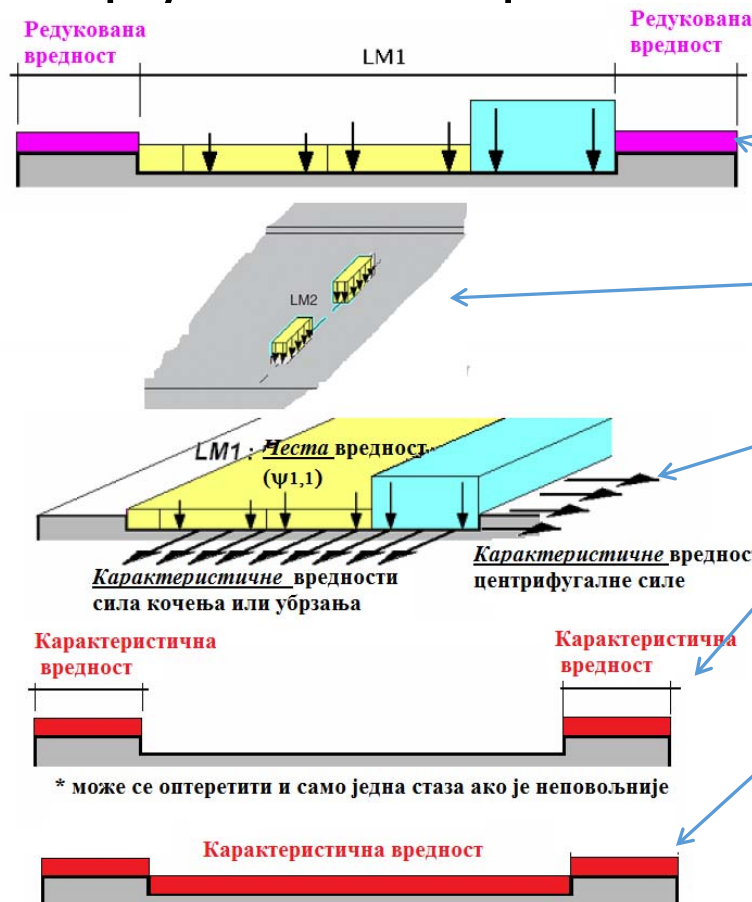
$$Q_{lk} = 0,6\alpha_{Q1}(2Q_{k1}) + 0,1\alpha_{q1}q_{1k}w_1L$$

$$\alpha_{Q1}180 \text{ kN} \leq Q_{lk} \leq 900 \text{ kN}$$

Попречна (центрифугалне силе)

Q_{tk}	r
$0.2\sum 2\alpha_{Qi}Q_i$	$r < 200\text{m}$
$40/r \cdot \sum 2\alpha_{Qi}Q_i$	$200\text{m} < r < 1500\text{m}$
0	$r > 1500\text{m}$

Групе оптерећења



- gr1a : LM1 + редукована вредност оптерећења пешачких стаза (3 kN /m^2)
- gr1b : LM2 (Једноосно оптерећење)
- gr2 : Карактеристична вредност хоризонталних сила од саобраћаја и честа вредност оптерећења LM1
- gr3 : оптерећење на пешачким и бициклистичким стазама
- gr4 : пешачка навала
- gr5 : специјална возила(+ одговарајући нормални саобраћај према правилима Националних анекса)
- gr6: 0,5 карактеристичних вредности LM1 са 0,5 карактеристичне вредности хоризонталних сила + карактеристична вредност на пешачким стазама (5 kN /m^2) – у ситуацијама замене лежишта

Коефицијенти ψ_i за друмске мостове

Дејство	Симбол	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Оптерећења од саобраћаја	gr 1a	TS	0,75	0,75
		UDL	0,40	0,40
		пешачке и бициклическе стазе	0,40	0,40
	gr1b (једноосовинско оптерећење)		0	0,75
	gr2 (хоризонталне силе)		0	0
	gr3 (оптерећење од пешака)		0	0,40
	gr4 (LM4 – оптерећење од навале људи)		0	0,75
	gr5 (LM5 – специјална возила)		0	0
Дејства ветра	F_{wk}			
	— Сталне прорачунске ситуације		0,6	0,2
	— Извођење		0,8	-
	F_w^*		1,0	-
Топлотна дејства	T_k		0,6 ³⁾	0,6
Оптерећења од снега	$Q_{Sn,k}$ (током извођења)		0,8	-
Оптерећења услед изградње	Q_c		1,0	-
				1,0

Правила за комбиновање – друмски МОСТОВИ

Оптерећења од снега и ветра не комбинују се са:

- силама кочења и убрзања или центрифугалним силама или групом оптерећења gr_2 ,
- оптерећењем на пешачким или бициклистичким стазама - gr_3 ,
- оптерећењем од навале људи - gr_4 .

Оптерећење од снега не комбинује се са:

- моделом оптерећења 1 и 2 то јест са gr_{1a} и gr_{1b} ,

Дејства ветра већа од $\min(F_w^* \text{ и } \psi_0 F_{wk})$ не комбинују се са моделом оптерећења 1 - gr_{1a} ($v_{b,0}=23 \text{ m/s} \Rightarrow F_w^*$). Дејства од ветра и температуре се не разматрају истовремено.

Сажете комбинације за друмске мостове

Гранично стање носивости

$$\left\{ \sum_{j \geq 1} (1.35 G_{kj, \text{sup}} + 1.00 G_{kj, \text{inf}}) \right\} \gamma_P P_k \begin{cases} 1.35(TS + UDL + q_{fk}^*) + 1.5 \times 0.6 F_{Wk, \text{traffic}} \\ 1.35 gr_{i=1b,2,3,4,5} \\ 1.5 T_k + 1.35(0.75 TS + 0.4 UDL + 0.4 q_{fk}^*) \\ 1.5 F_{Wk} \\ 1.5 Q_{Sn,k} \end{cases}$$

Гранично стање употребљивости -
карактеристична комбинација

$$\left\{ \sum_{j \geq 1} (G_{kj, \text{sup}} + G_{kj, \text{inf}}) \right\} P_k \begin{cases} (TS + UDL + q_{fk}^*) + 0.6 F_{Wk, \text{traffic}} \\ gr_{i=1b,2,3,4,5} + 0.6 T_k \\ gr_{1b} \\ T_k + (0.75 TS + 0.4 UDL + 0.4 q_{fk}^*) \\ F_{Wk} \\ Q_{Sn,k} \end{cases}$$

Гранично стање употребљивости -
честа комбинација

$$\left\{ \sum_{j \geq 1} (G_{kj, \text{sup}} + G_{kj, \text{inf}}) \right\} P_k \begin{cases} (0.75 TS + 0.4 UDL) + 0.5 T_k \\ 0.75 gr_{1b} \\ 0.75 gr_4 + 0.5 T_k \\ 0.6 T_k \\ 0.2 F_{Wk} \\ 0.5 Q_{Sn,k} \end{cases}$$

Гранично стање употребљивости -
квазистална комбинација

$$\left\{ \sum_{j \geq 1} (G_{kj, \text{sup}} + G_{kj, \text{inf}}) \right\} P_k + 0.5 T_k$$

Модели оптерећења на замор

(FLM1)

Слично карактеристичним вредностима LM1 (али без α фактора).
 $0,7 \times Q_{ik} + 0,3 \times q_{ik} + 0,3 \times q_{rk}$

(FLM2)

Скуп "фреквентних" камиона

(FLM3)

Једно возило

(FLM4)

Скуп "еквивалентних" камиона

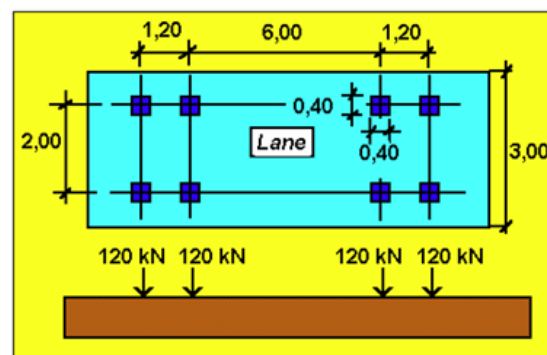
(FLM5)

Мерени саобраћај

FLM 2

1	2	3	4
LORRY SILHOUETTE	Axle spacing (m)	Frequent axle loads (kN)	Wheel type (see Table 4.6)

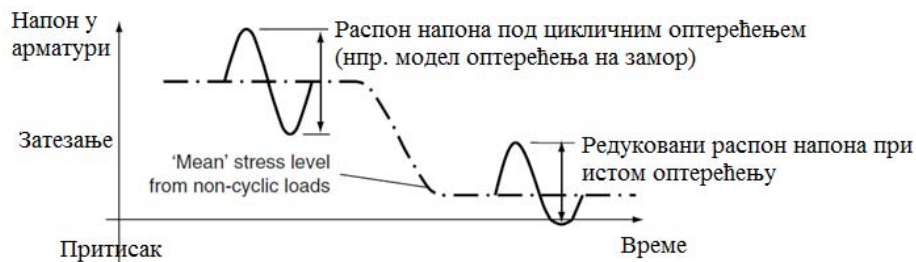
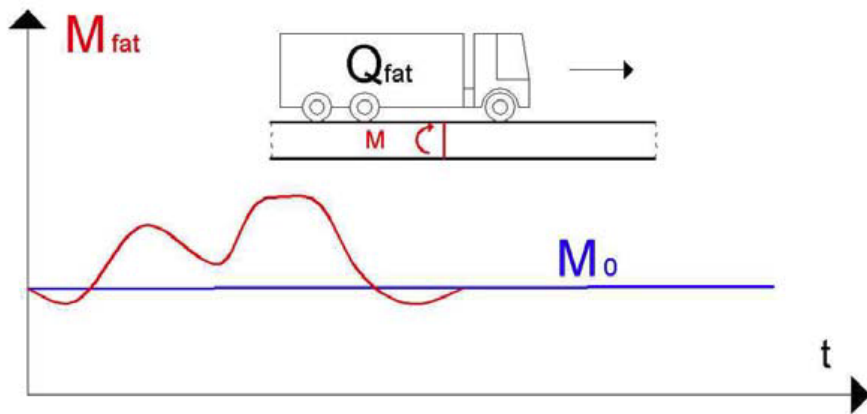
FLM 3



FLM 4

Тип камиона		Размак осовина (m)	Осовинска оптерећења (kN)	Учешће камиона зависно од врсте саобраћаја p_i (%)		
i	тежина (kN)			Дуге релације	средње релације	Локални саобраћај
1	200	4,50	70 130	20	40	80
2	310	4,20 1,30	70 120 – 120	5	10	5
3	490	3,20 – 5,20 1,30 – 1,30	70 – 150 90 – 90 – 90	50	30	5
4	390	3,40 – 6,00 1,80	70 – 140 90 – 90	15	15	5
5	450	4,80 – 3,60 4,40 – 1,30	70 – 130 90 – 80 – 80	10	5	5

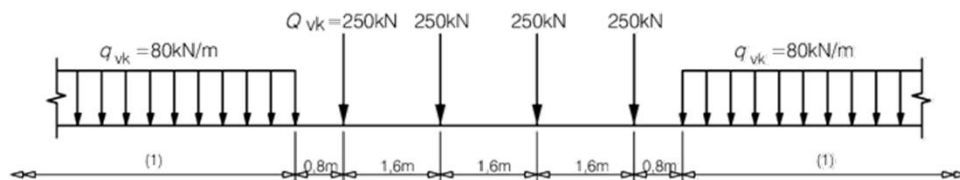
Опсег напона при контроли на замор



- Средња вредност напона је значајна јер одређује да ли се мења знак напона под цикличним оптерећењем.
- Контролу на замор није потребно спроводити за:
 - Пешачке мостове
 - Укопане лукове или рамове (пропусти) са минималним надслојем 1,0 m (друмски мостови)/ 1,5m (железнички)
 - Темељи
 - Стубови који нису круто везани за коловозну конструкцију
 - Опорци који нису круто везани с коловозном конструкцијом
 - Челику за армирање и претходно напрезање који се налази у областима које под честом комбинацијом оптерећења остаје у притиску

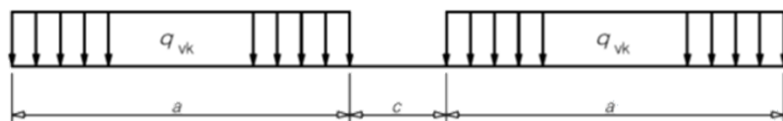
Саобраћајна оптерећења железничких мостова

Модел оптерећења LM71



Фактор категорије пруге: 0,75 – 0,83 – 0,91 – 1,0 – 1,10 – 1,21- 1,33

Модел оптерећења SW/0 и SW/2



Модел оптерећења	q_{vk} [kN/m]	a [m]	c [m]
SW/0	133	15,0	5,3
SW/2	150	25,0	7,0

Динамички коефицијент Φ

$$\Phi = \frac{1,44}{\sqrt{L_{\Phi}} - 0,2} + 0,82$$

$$\Phi_3 = \frac{2,16}{\sqrt{L_{\Phi}} - 0,2} + 0,73$$

Хоризонталне силе од железничког саобраћаја

Подужна (покретање и кочење)

Кочење

$$Q_{lbk} = 20[\text{kN/m}] L_{a,b}[\text{m}] \leq 6000 \text{ kN}$$

$$\text{За SW/2} \quad Q_{lbk} = 35[\text{kN/m}] L_{a,b}[\text{m}]$$

Покретање

$$Q_{lak} = 33[\text{kN/m}] L_{a,b}[\text{m}] \leq 1000 \text{ kN}$$

Попречна (сила бочних удара и центрифугална сила)

Сила бочних удара

$$Q_{sk} = 100 \text{ kN}$$

Центрифугалне силе

$$Q_{tk} = \frac{v^2}{g \times r} (f \times Q_{vk}) = \frac{V^2}{127r} (f \times Q_{vk})$$

$$q_{tk} = \frac{v^2}{g \times r} (f \times q_{vk}) = \frac{V^2}{127r} (f \times q_{vk})$$

Коефицијенти ψ_i за железничке мостове 1

Дејства		Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Појединачне компоненте саобраћајних дејстава	LM 71	0,80	1)	0
	SW/0	0,80	1)	0
	SW/2	0	1,00	0
	Неоптерећен воз	1,00	-	-
	HSLM	1,00	1,00	0
	Покретање и кочење Центрифугалне силе Силе интеракције услед деформације под вертикалним оптерећењем од саобраћаја	Појединачне компоненте дејстава од саобраћаја у прорачунским ситуацијама у којима се оптерећења од саобраћаја посматрају као једно доминантно дејство (мулти-дирекционално), а не као групе оптерећења, треба да користе исте вредности ψ коефицијената као и оне које су усвојене за пратећа вертикална оптерећења.		
	Силе од бочних удара	1,00	0,80	0
	Оптерећења од сервисних пешачких стаза	0,80	0,50	0
	Реални возови	1,00	1,00	0
	Хоризонтални притисак тла услед саобраћајног оптерећења	0,80	0	0

Групе саобраћајних оптерећења – железнички мостови

Број колосека			Групе оптерећења			Вертикална оптерећења			Хоризонтална оптерећења			Напомена
			Према EN 1991-2			6.3.2/6.3.3	6.3.3	6.3.4	6.5.3	6.5.1	6.5.2	
1	2	≥3	Број оптерећених колосека	Група оптерећења	Оптерећење у колосеку	LM 71 ⁽¹⁾ SW/O ^{(1) (2)} HSLM ^{(6) (7)}	SW/2 ^{(1) (3)}	Неоптерећен воз	Покретање и кочење ⁽¹⁾	Центрифугалне силе ⁽¹⁾	Бочни дари ⁽¹⁾	
			1	Група 11	T ₁	1			1 ⁽⁵⁾	0,5 ⁽⁵⁾	0,5 ⁽⁵⁾	Максимално вертикално 1 са подужним
			1	Група 12	T ₁	1			0,5 ⁽⁵⁾	1 ⁽⁵⁾	1 ⁽⁵⁾	Максимално вертикално 2 са попречним
			1	Група 13	T ₁	1 ⁽⁴⁾			1	0,5 ⁽⁵⁾	0,5 ⁽⁵⁾	Максимално подужно
			1	Група 14	T ₁	1 ⁽⁴⁾			0,5 ⁽⁵⁾	1	1	Максимално бочно
			1	Група 15	T ₁			1		1 ⁽⁵⁾	1 ⁽⁵⁾	Бочна стабилност са „Неоптерећеним возом“
			1	Група 16	T ₁		1		1 ⁽⁵⁾	0,5 ⁽⁵⁾	0,5 ⁽⁵⁾	SW/2 са максималним подужним
			1	Група 17	T ₁		1		0,5 ⁽⁵⁾	1 ⁽⁵⁾	1 ⁽⁵⁾	SW/2 са максималним попречним
			2	Група 21	T ₁ T ₂	1 1			1 ⁽⁵⁾ 1 ⁽⁵⁾	0,5 ⁽⁵⁾ 0,5 ⁽⁵⁾	0,5 ⁽⁵⁾ 0,5 ⁽⁵⁾	Максимално вертикално са подужним
			2	Група 22	T ₁ T ₂	1 1			0,5 ⁽⁵⁾ 0,5 ⁽⁵⁾	1 ⁽⁵⁾ 1 ⁽⁵⁾	1 ⁽⁵⁾ 1 ⁽⁵⁾	Максимално вертикално са попречним
			2	Група 23	T ₁ T ₂	1 ⁽⁴⁾ 1 ⁽⁴⁾			1 1	0,5 ⁽⁵⁾ 0,5 ⁽⁵⁾	0,5 ⁽⁵⁾ 0,5 ⁽⁵⁾	Максимално подужно
			2	Група 24	T ₁ T ₂	1 ⁽⁴⁾ 1 ⁽⁴⁾			0,5 ⁽⁵⁾ 0,5 ⁽⁵⁾	1 1	1 1	Максимално попречно
			2	Група 26	T ₁ T ₂	1 1	1		1 ⁽⁵⁾ 1 ⁽⁵⁾	0,5 ⁽⁵⁾ 0,5 ⁽⁵⁾	0,5 ⁽⁵⁾ 0,5 ⁽⁵⁾	SW/2 са максималним подужним
			2	Група 27	T ₁ T ₂	1 1	1		0,5 ⁽⁵⁾ 0,5 ⁽⁵⁾	1 ⁽⁵⁾ 1 ⁽⁵⁾	1 ⁽⁵⁾ 1 ⁽⁵⁾	SW/2 са максималним попречним
			≥3	Група 31	T _i	0,75			0.75 ⁽⁵⁾	0.75 ⁽⁵⁾	0.75 ⁽⁵⁾	Додатни случај оптерећења

Коефицијенти ψ_i за железничке мостове 2

Главна дејства од саобраћаја (групе оптерећења)	Група 11 (gr11)	0.8	0.8	0
	Група 12 (gr12)			
	Група 13 (gr13)			
	Група 14 (gr14)			
	Група 15 (gr15)			
	Група 16 (gr16)			
	Група 17 (gr17)			
	Група 21 (gr21)	0.8	0.7	0
	Група 22 (gr 22)			
	Група 23 (gr11)			
	Група 24 (gr24)			
	Група 26 (gr26)			
	Група 27 (gr 27)			
	Група 31 (gr31)	0.8	0.6	0

Коефицијенти ψ_i за железничке мостове 3

Остала дејства	Аеродинамички утицаји	0.8	0.5	0
	Опште оптерећење током одржавања сервисне пешачке стазе	0.8	0.5	0
Силе ветра	F_{wk}	0.75	0.5	0
	F_{wk}^{**}	1.0	0	0
Термичка дејства	T_k	0.6	0.6	0.5
Оптерећење од снега	$Q_{Sn,k}$ (током извођења)	0.8	-	-
Оптерећења при извођењу	Q_c	1.0	-	1.0

Правила за комбиновање – железнички МОСТОВИ

Дејства снега се не узимају у обзир након завршетка градње моста.

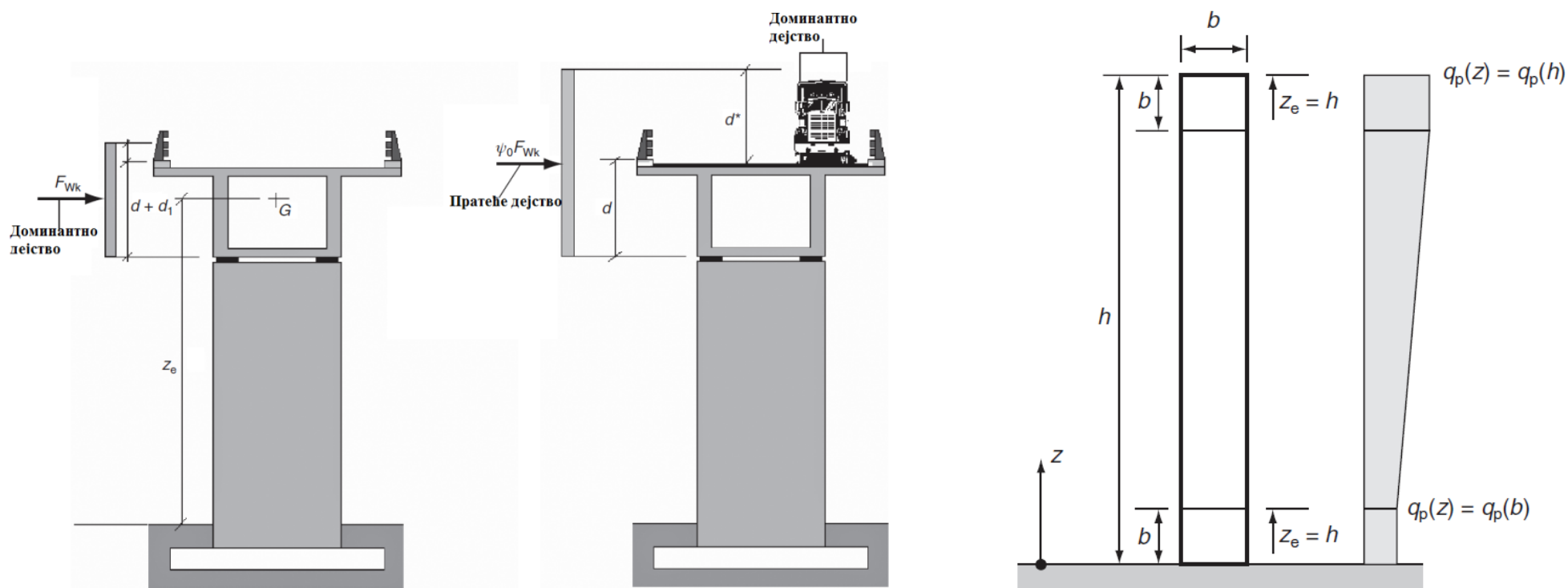
Дејства ветра већа од $\min(F_{W^{**}} \text{ и } \psi_0 F_{Wk})$ не комбинују се саобраћајним оптерећењима ($v_{b,0}=25 \text{ m/s} \Rightarrow FW^{**}$).

Дејства ветра се не комбинују са групама саобраћајног оптерећења gr13 и gr23 (кочење), gr16, gr17 и gr26, gr27 (SW/2).

Саобраћајна оптерећења и дејства ветра се комбинују на следећи наћин:

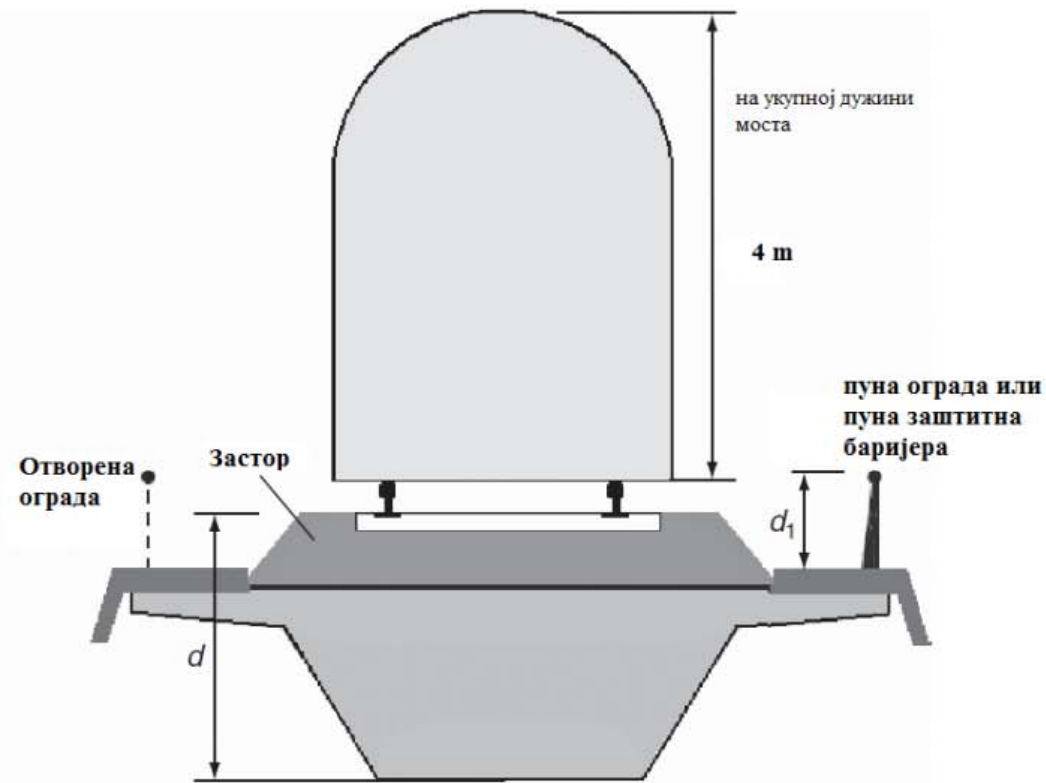
- Верт. саобраћајна оптерећења са динамичким коефицијентом, хор. саобраћајна оптерећења и дејства ветра, свако као појединачно доминантно променљиво дејство;
- Верт. саобраћајна оптерећења без динамичког коефицијента и попречна саобраћајна оптерећења услед „неоптерећеног воза— и дејства ветра (стабилност на претурање).

Дејство ветра (SRPS EN 1991-1-4 одељак 8)



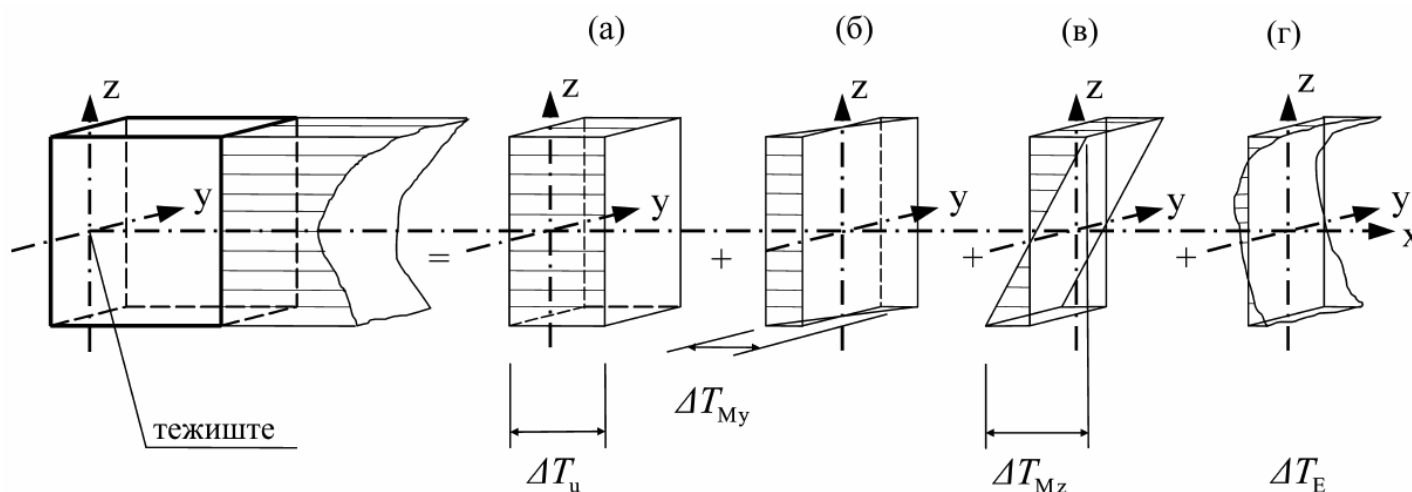


Друмски мост



Железнички мост

Топлотна дејства (SRPS EN 1991-1-5 одељак 6)



а) компонента равномерне температуре, ΔT_u ;

б) компонента линеарно променљиве температурне разлике око осе z-z, ΔT_{My} ;

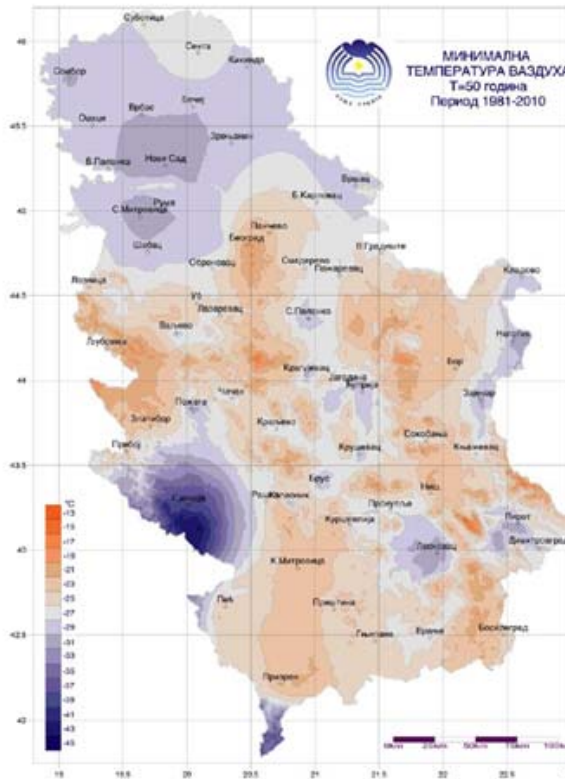
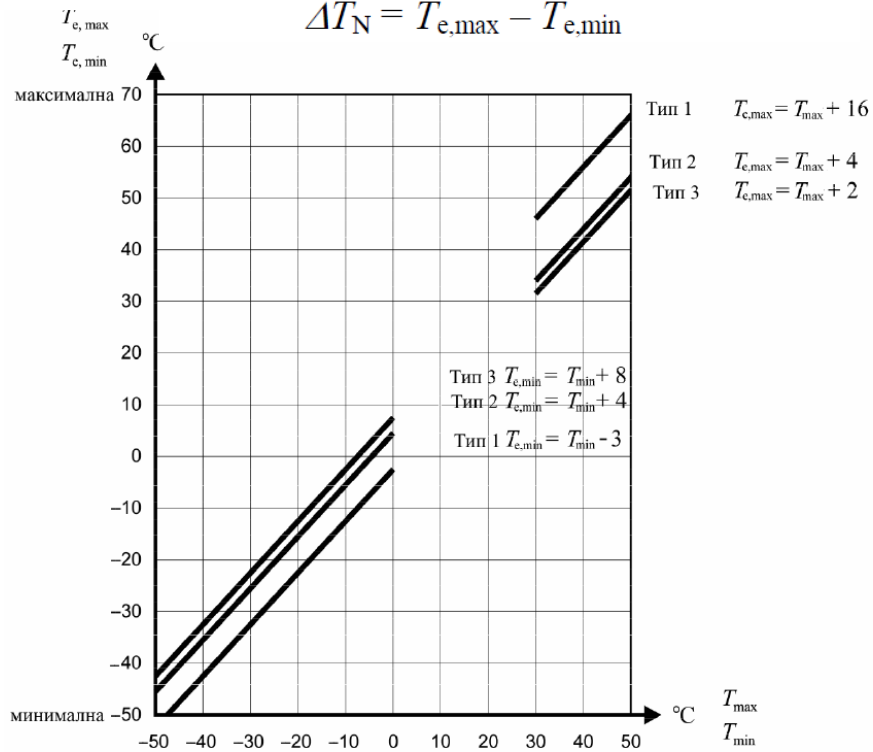
в) компонента линеарно променљиве температурне разлике око осе y-y; ΔT_{Mz} ;

г) компонента нелинеарне температурне разлике ΔT_E . Ово резултира унутрашњем уравнотеженим системом напона, који не производе спољна оптерећења на слободним елементима.

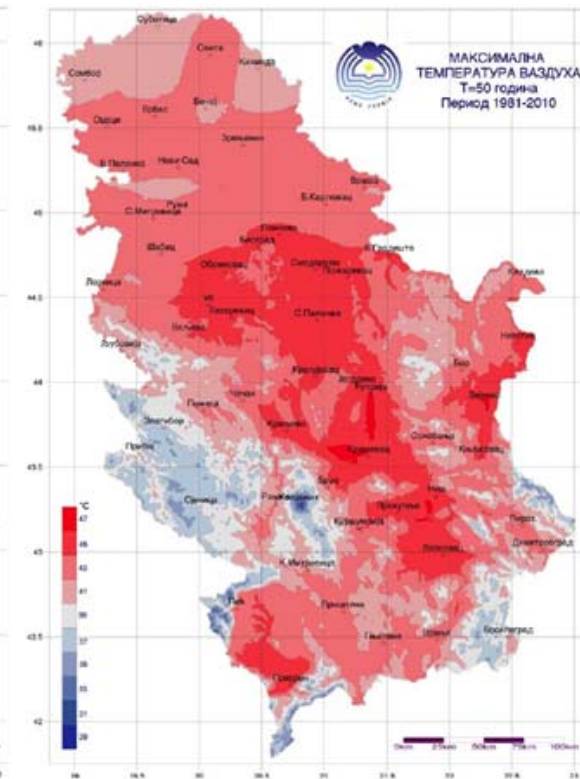
Равномерна промена температуре

$$\Delta T_{N,con} = T_0 - T_{e,m} \quad \Delta T_{N,exp} = T_{e,max} - T_0$$

$$\Delta T_N = T_{e,max} - T_{e,min}$$



Слика А.1 – Минималне температуре ваздуха у хладу



Слика А.2 – Максималне температуре ваздуха у хладу

НАПОМЕНА 1 Вредности на слици 6.1, засноване су на дневним температурним опсезима од 10 °C. Такав опсег може да се сматра одговарајућим за већину држава чланица.

НАПОМЕНА 2 За челичне решеткасте и пуне носаче, дате максималне вредности за тип 1 могу да се умање за 3 °C.

Слика 6.1 — Корелација између минималних/максималних температура ваздуха у хладу $T_{e,min}/T_{e,max}$ и минималних/максималних компонената равномерне температуре моста $T_{e,min}/T_{e,max}$

Грађевински факултет Универзитета у Београду, 2024.

Температурна разлика

Тип попречног пресека бетонске коловозне конструкције / застор		Горња страна топлија (°C)	Доња страна топлија (°C)
Плочасти и ребрасти пресек / Сандучасти пресек	Без застора	12/8	8.8/5.5
	Само са тамном хидроизолацијом	22.5/15	8/5
	50 mm коловозног застора	15/10	8/5
	100 mm коловозног застора	10.5/7	8/5
	150 mm коловозног застора	7.5/5	8/5
	Тежак застор–баласт (750 mm)	9/6	8/5

Уколико делују истовремено, промена температуре у оси и линеарна температурна разлика се комбинују на следћи начин:

$$\Delta T_{M,heat} \text{ (или } \Delta T_{M,cool}) + \omega_N \Delta T_{N,exp} \text{ (или } \Delta T_{N,con})$$

или

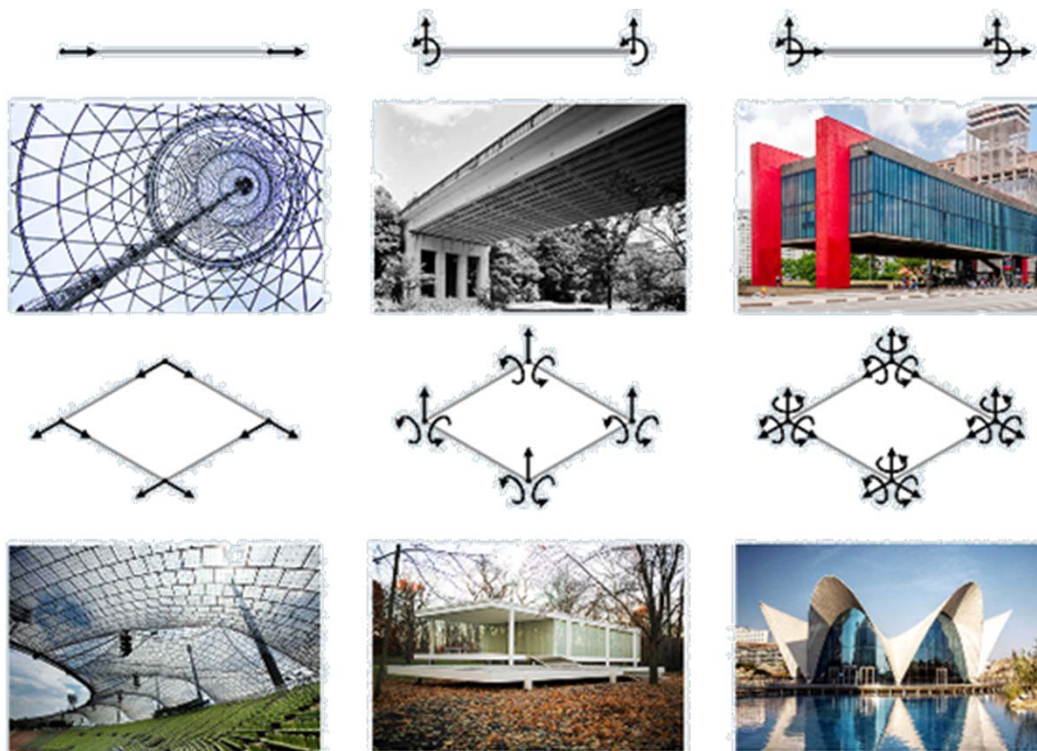
$$\omega_M \Delta T_{M,heat} \text{ (или } \Delta T_{M,cool}) + \Delta T_{N,exp} \text{ (или } \Delta T_{N,con})$$

$$\omega_N = 0,35 \quad \omega_M = 0,75.$$

Подлоге за пројектовање

- ❑ Просторско – урбанистичке подлоге (локација и намена моста);
- ❑ Саобраћајне подлоге (подаци о саобраћају на мосту: тип саобраћајнице, интензитет и развој саобраћаја и предвиђене брзине као и о условима саобраћаја за време грађења моста у градским срединама);
- ❑ Подаци о путу на коме се пројектује мост (ситуација трасе, уздужни профил, попречни профили на делу моста и нормални попречни профил пута);
- ❑ Геодетске подлоге;
- ❑ Геолошко-геомеханичке подлоге;
- ❑ Хидролошко-хидротехничке подлоге;
- ❑ Метеролошко – климатске подлоге;
- ❑ Сеизмолошке податке о локацији моста;
- ❑ Пројектни задатак:
 - Опште податке (Инвеститор, објекат, називи пута и препреке);
 - Податке о подлогама за пројектовање;
 - Попис закона, прописа, правилника и норматива на основу којих се пројектује мост;
 - Посебне услове (опрема, век трајања и одржавање, услови за извођење, естетски услови, фазе и садржај документације, поступак ревизије и овере документације).

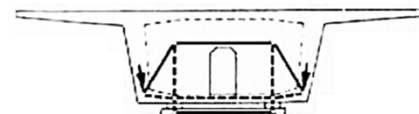
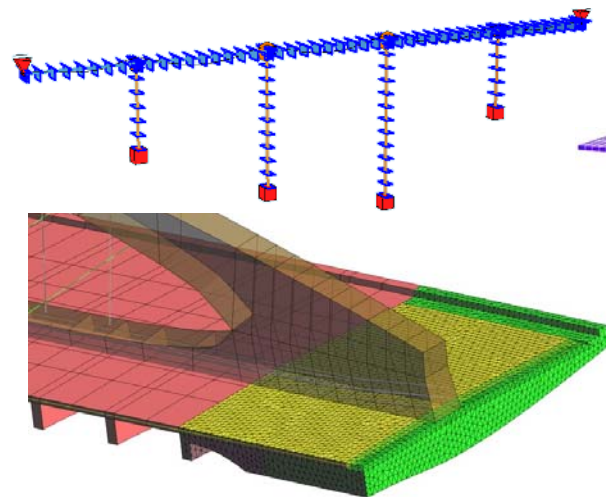
МЕТОДЕ АНАЛИЗЕ КОНСТРУКЦИЈА



Глобална и локална анализа

- Глобална анализа се најчешће спроводи на системима у равни (линијски или роштиљни системи).
- Резултати су усаглашени са правилима за димензионисање датим у кодовим

- Локације где поставке теорије греде (Бернулијеве хипотезе) нису испуњене
 - у близини ослонаца;
 - у зони концентрисаних оптерећења;
 - у чворовима греда–стуб;
 - у зонама котви;
 - на местима промене попречног пресека елемента.



- Локална анализа се обично спроводи методом замењујуће решетке (strut-and-tie).

Методе анализе

- **Линеарно еластична анализа**
 - попречни пресеци су без прслина,
 - однос напон–дилатација је линеаран,
 - средња вредност модула еластичности
- Важи принцип суперпозиције у ГСН.
- Развој прслина у ГСУ?
- Ефекти принудних деформација
- **Линеарна еластична анализа са ограниченом прерасподелом**
 - Захтева се капацитет ротације
 - ЕЦ 2 допушта 15% прерасподеле
 - Изазива промену утицаја у попречном правцу
 - Контрола трансверзалних сила пре и након прерасподеле
 - Не примењује се код мостова у кривини (пораст торзионих момената)
 - Не применјује се на стубове рама

Методе анализе

- Пластична анализа
 - Екстреман случај прерасподеле
 - Обавезна контрола капацитета ротације
 - Употребљива само за ГСН
 - Може бити практична за инцидентне ситуације
- Модел притиснутих штапова и затега (strut-and-tie)
 - Базира се на решењу на доњој граници према теорији пластичности
 - Често се примењује у локалном зонама где не важе поставке Бернулије хипотезе
 - Модел решетке је препоручљиво формирати према распореду главних напона у еластичном решењу

Нелинеарна анализа и ефекти другог реда

- Нелинеарно понашање бетона:

- Појава прслина
- Нелинеарни дијаграм напон – дилатација
- Вискоеластично понашање (ГСУ)
- Истовремено повећавање свих оптерећења
- Није погодан за практичну употребу

- Теорија другог реда:

- Аксијално оптерећени елементи
- Геометрисјка нелинеарност
- Не важи принцип суперпозиције
- Промена крутости на савијање (EI - матријална нелинераност)
- Ефекат течења бетона