



UNIVERZITET U TUZLI
RUDARSKO-GEOLOŠKO-GRAĐEVINSKI FAKULTET



LUČNE BRANE



Prof. dr. sc. NEDIM SULJIĆ, dipl.ing.građ.

1

•Lučna brana → primjena efekta površinskog nosača



opterećenje prenosi na oslonce u padinama (stranama) i u dnu rijeke



dio opterećenja prenosi se “konzolno” u dno padine

dio opterećenja prenosi se “lučno” u padine (strane)



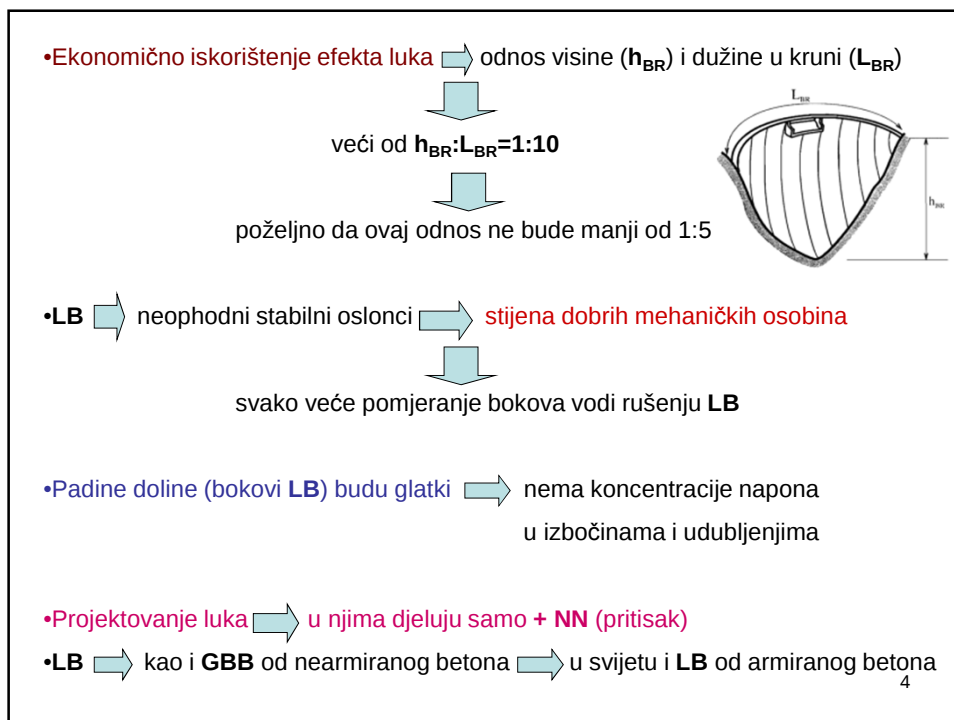
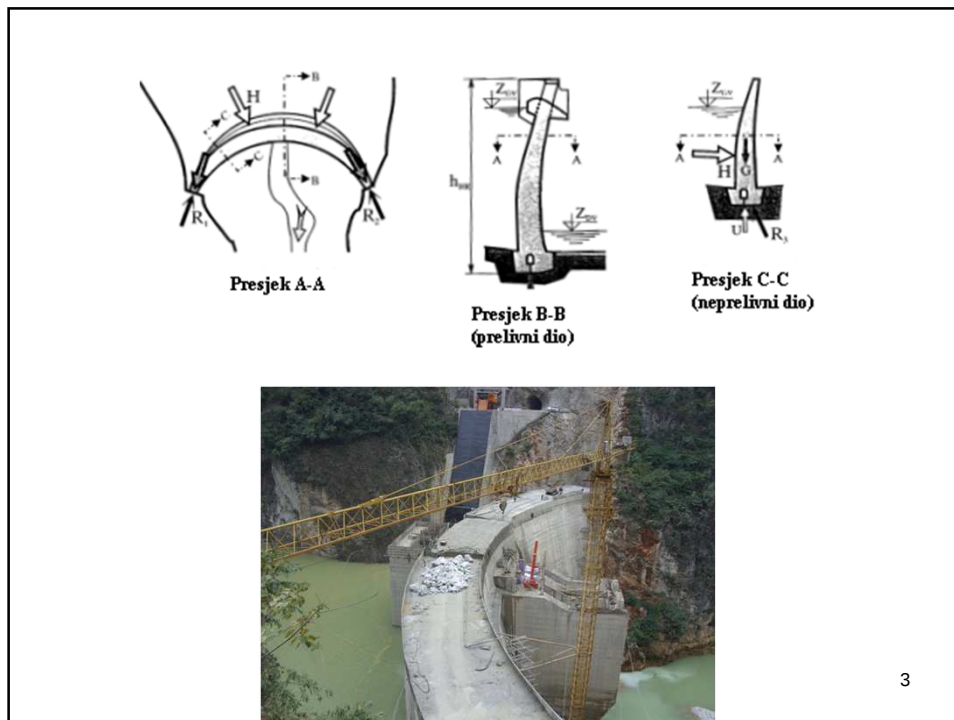
bolja raspoređenost napona u betonu nego kod GBB

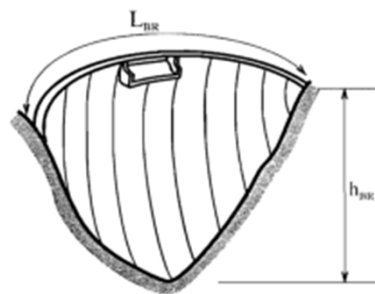


dobijamo znatno manju V konstrukcije



2



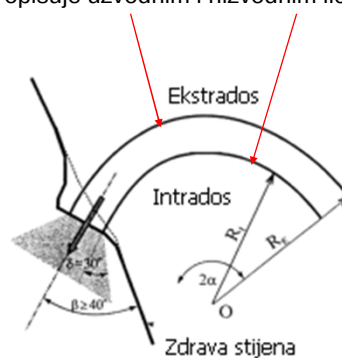


Odnos visine lučne brane i dužine u kruni

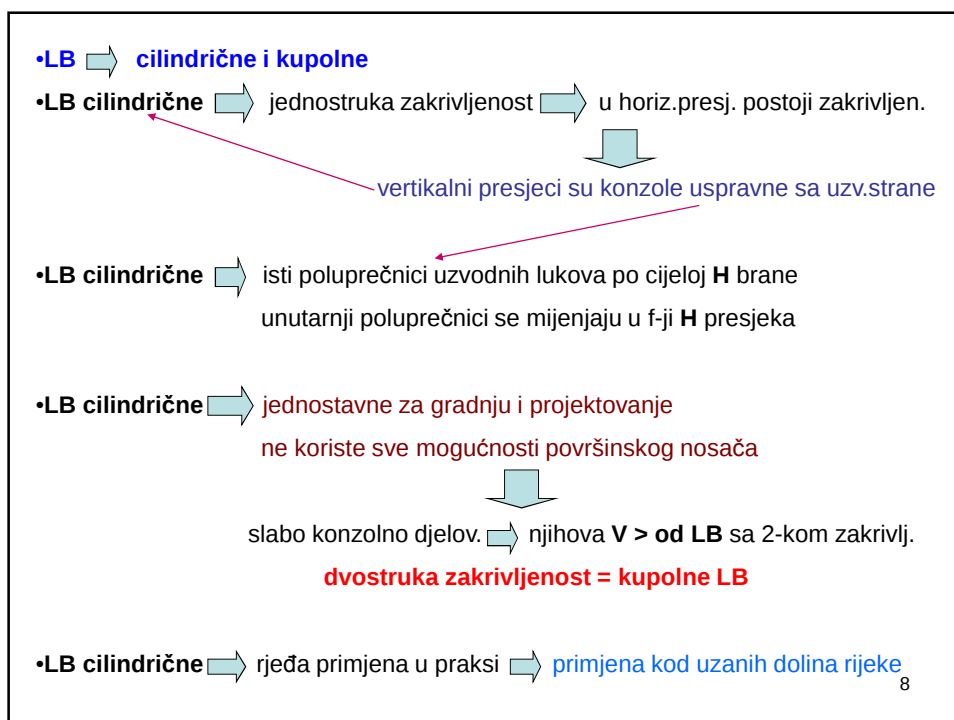
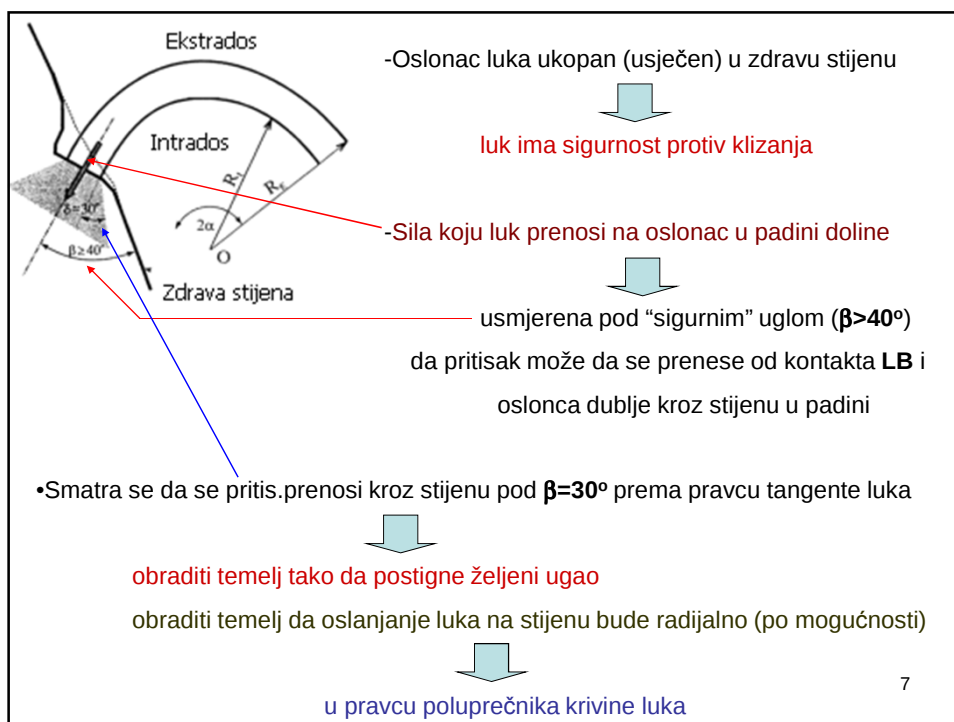


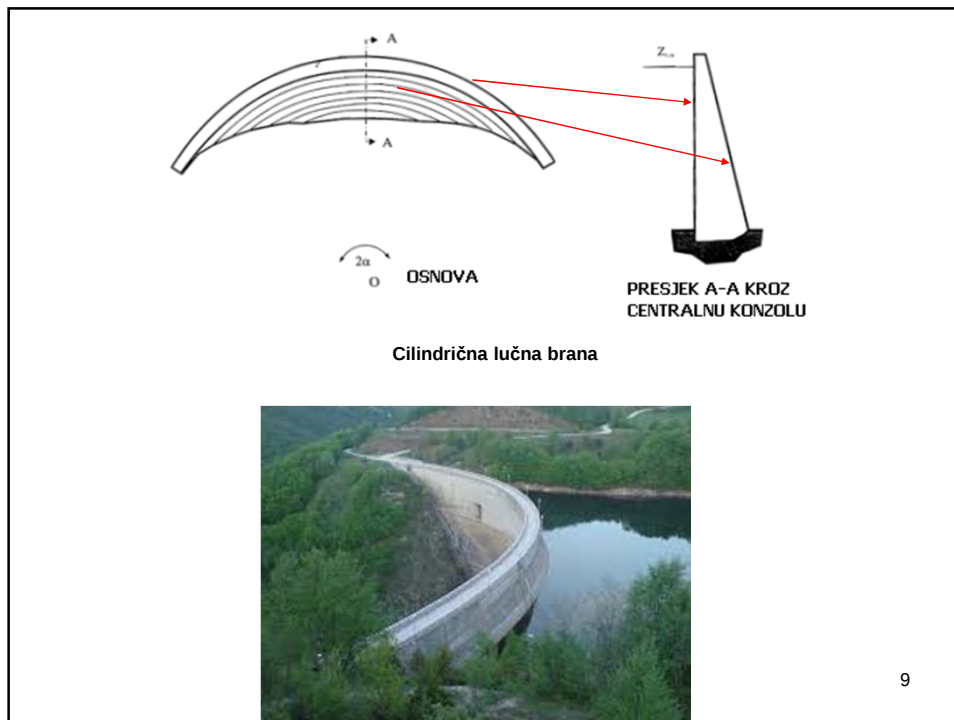
5

- LB = prostorni površinski nosač
- LB → radi jednostavnijeg proračuna smatramo sistem lukova i konzola
- LB → uzvodna strana luka = EKSTRADOS
- LB → nizvodna strana luka = INTRADOS
- LB → konzola se opisuje uzvodnim i nizvodnim licem (kao kod GBB)



6





- **LB kupolna** → krivina u horiz.presjeku i u vertik.ravni
 ↓
 tj. zakrivljena konzola (uzvodno i nizvodno lice)
- **Uproštena analiza** → primjena "kotlovske" formule
 optimalni centralni ugao spoljnjeg luka (ekstrados)
 po cijeloj **H** brane → $2\alpha = 133^\circ$
- Zbog uslova pri oslanjanju lukova →
 obično se ne može postići centralni ugao veći od 110° do 120°

10

- Nije povoljno ni održavati istu vrijednost centralnog ugla po cijeloj **H** brane

moguć neželjeni efekat kontra nagiba konzole brane u višim dijelovima
(blizu oslonaca)

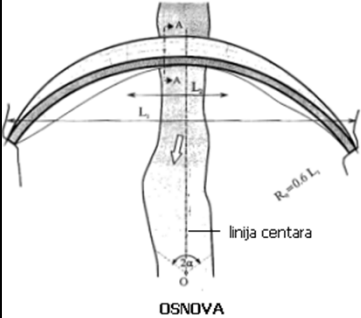
tada su krajevi brane nagnuti ka nizvodnoj strani

niži nivoi u akumul. → nepovoljno opterećenje → teškoće pri gradnji

- Zbog toga → centralni ugao i poluprečnici ekstradosa i intradosa kupolnih **LB**

mijenjaju se po visini → prateći glatku krivu liniju

11



-Presjek doline nesimetričan

desni i lijevi dio luka projektovati sa različitim polupr. i sa dvije ili tri linije centara

dodatno usloženjeno projektovanje i gradnja

- Izrazito nesimetrični profili → nisu povoljni za **LB**

usljed koncentracije napona dobijamo deblje i skuplje konstrukcije

bolje postaviti **LB** na drugi profil → tehnički i ekonomski isplativije

ili gradnjom većih oslonaca na padini učiti profil što simetričnijim

12

- Projektovanje **LB** $\Rightarrow$ složen postupak $\Rightarrow$ uklapanje **LB** u teren
- Postavljanje **LB** u prirodi $\Rightarrow$ zahtjevnije od postavljanja **GBB** i nasutih brana

složena geometrija koju nameću krivine lukova i konzola

- Voditi računa o debljini drobine i uslovima fundiranja

- Uporedo sa uklapanjem sa terenom računamo naponsko stanje

vidjeti koji dijelovi **LB** su previše ili premalo iskorišteni

određene lukove radimo manje debljine ili veće debljine

tada se mijenjaju i poluprečnici krivina i centralni uglovi lukova

13

- Iterativni postupak projektovanja položaja **LB** i proračuna

rješenje optimalno korisne konstruktivne mogućnosti reljefa $\Rightarrow$ oblik **LB**

naponi u prihvatljivim granicama za sve komb. opter. uz min. **V** brane



14

- Početne faze projektovanja (idejni projekt ...) → "iskustvena" metoda

preliminarna procjena dimenzija i oblika i uklapanje **LB** u teren

- "Iskustvena" metoda → kao početna iteracija pri konačnom oblikovanju **LB**



15

- Prvo za razmatranu **H** brane (h_{BR}) sa topografske podloge pregradnog mjesta

— odrediti **B** doline na **KKB** (L_1) i L_2 na koti koja odgovara 15% **H** brane ($0,15h_{BR}$)

na osnovu L_1 , L_2 i h_{BR} → statistička analiza velikog broja **LB**

imamo iskustvene j-ne za promjenu debljine i oblika centralne konzole

centralna konzola = najviša konzola oslonjena obično u riječno dno

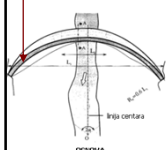
- Debljinu centralne konzole računamo:

u kruni (t_K) ; u temelju (t_T) i presjeku na $0,45 h_{BR}$ iznad temelja $t_{0,45}$

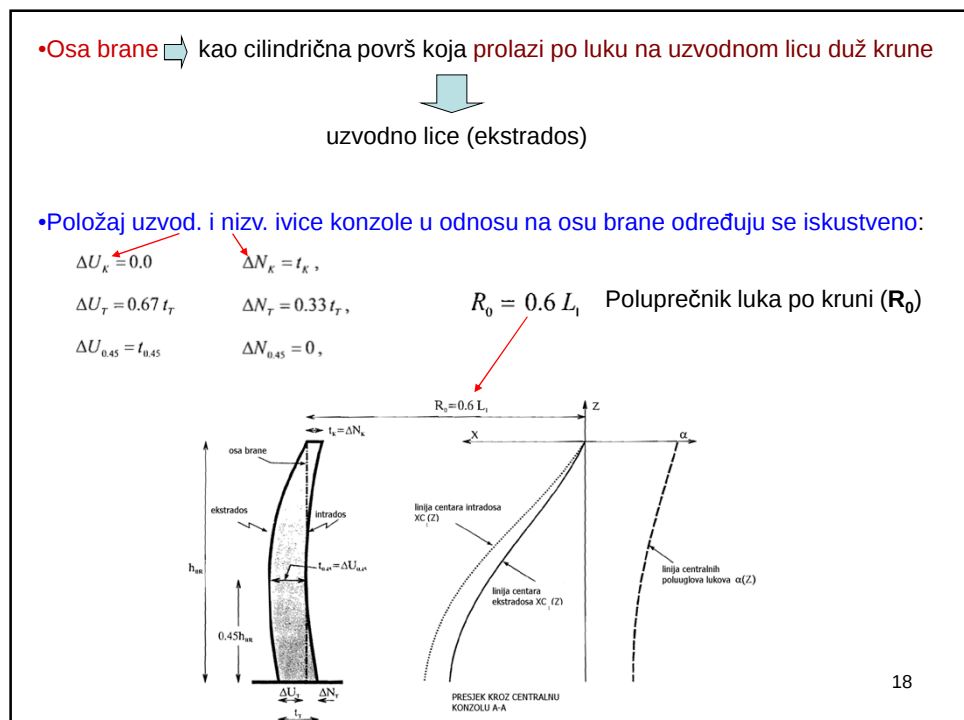
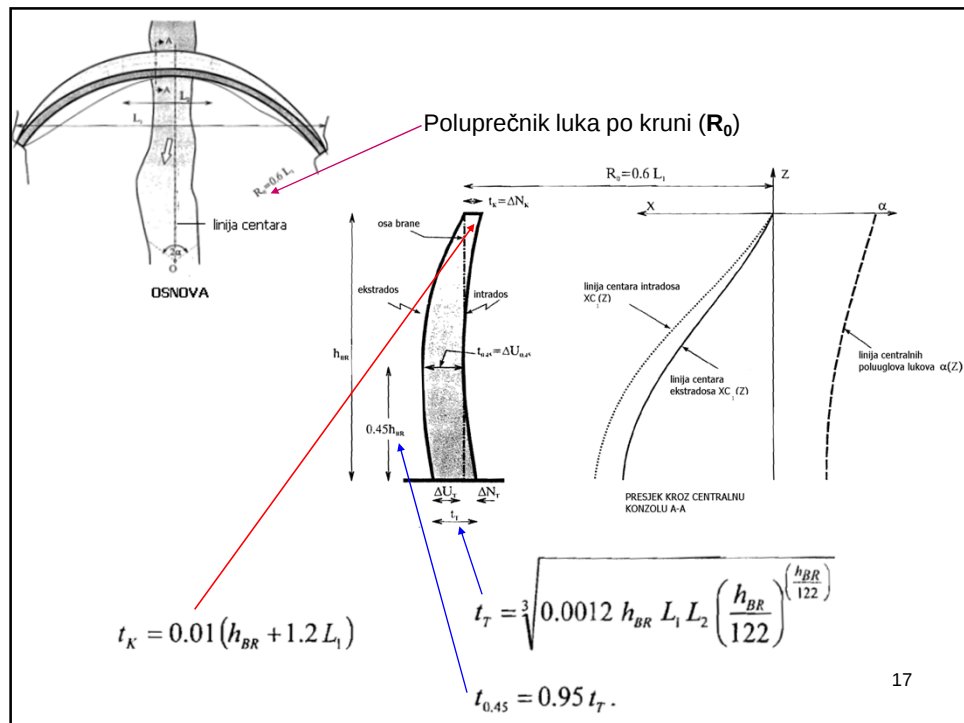
$$t_K = 0.01 (h_{BR} + 1.2 L_1)$$

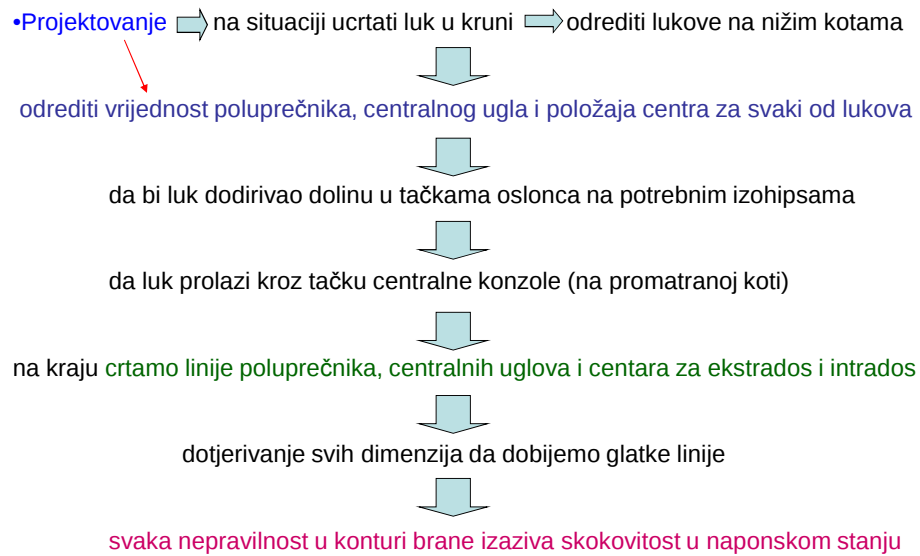
$$t_T = \sqrt[3]{0.0012 h_{BR} L_1 L_2 \left(\frac{h_{BR}}{122} \right)^{\left(\frac{h_{BR}}{122} \right)}}$$

$$t_{0,45} = 0.95 t_T$$



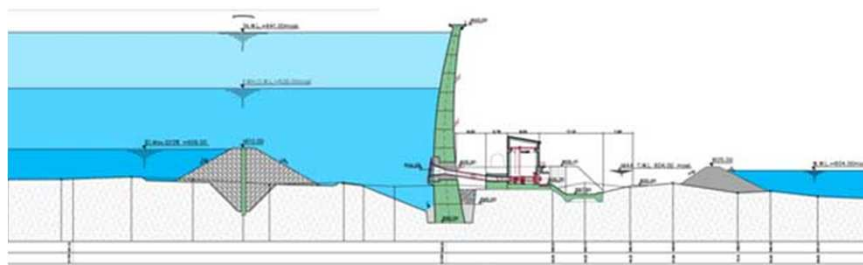
16





19

- Na osloncima ➡ veće koncentracije napona ➡ povećati debljinu luka u osloncu
- Moguće rješenje ➡ lukovi na višim kotama (manje opterećeni) ➡ const. debljine
- ➡ lukovi na nižim kotama (više opterećeni) šire se u osloncima



20

- Ispravan proračun **LB** $\Rightarrow$ sigurna i ekonomična konstrukcija
- Uporedo sa oblikovanjem **LB** $\Rightarrow$ provjeriti da naponi i pomjeranja
 $\Downarrow$
 zadovoljavaju uslove nosivosti i stabilnosti konstrukcije
- Opterećenja koja djeluju na **GBB** djeluju i na **LB**
 $\Downarrow$
 samo se drugačije prenose kroz objekat do oslonca
- **LB** $\Rightarrow$ izraženiji uticaj od temp. na stanje napona nego kod **GBB**
- **LB** $\Rightarrow$ znatno manje izražen uticaj uzgona nego kod **GBB**

21

- Novije vrijeme $\Rightarrow$ proračun stanja napona i deformacija $\Rightarrow$ **MKE**
- Početne faze projektovanja $\Rightarrow$ primjena približnih metoda
 $\Downarrow$
 metoda jedne konzole i više lukova
 metoda više konzola i više lukova
- Navedene metode $\Rightarrow$ pretpostavka $\Rightarrow$ od opter. djeluje samo hidrost. pritisak
 $\Downarrow$
 neki slučajevi prihvatljivo uprošćenje
- Jedan dio opterećenja prihvata luk $\Rightarrow$ nose više opter. u gornjim dijelovima **LB**
- Drugi dio opterećenja prihvata konzola $\Rightarrow$ nosi više optereć. u donjem dijelu **LB**

22

- Prvi uslov iz koga računamo napone i pomjeranja:



da zbir optereć. koje prima konzola i optereć. koje prima luk u zajedničkoj (presječnoj) tački razmatranog luka i konzole bude jednak hidrostatičkom pritisku u toj tački

- Drugi uslov:

na osnovu jednakosti radijalnog pomjeranja luka i konzole u zajedničkoj tački

- Prvi i drugi uslov $\Rightarrow$ sistem j-na za rješavanje problema

- Mnoge LB u prvoj polovini XX vijeka $\Rightarrow$ računate primjenom **kotlovske formule**



jednostavna formula uz primjenu korekcionog faktora

23

- LB $\Rightarrow$ umjesto kontrole protiv klizanja $\Rightarrow$ radimo mnogo složeniji proračun



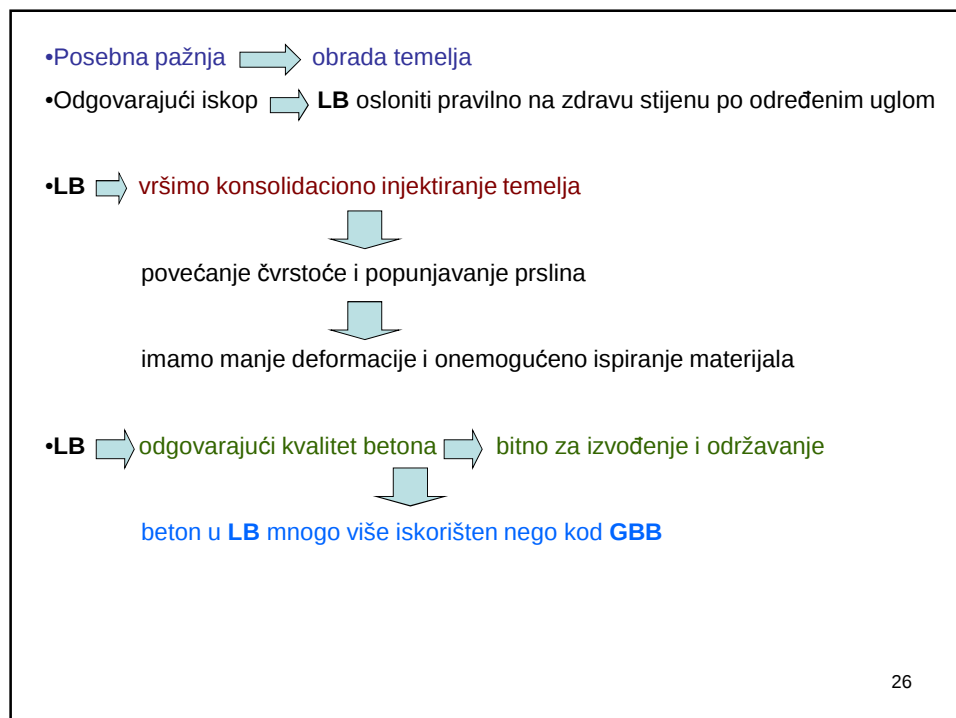
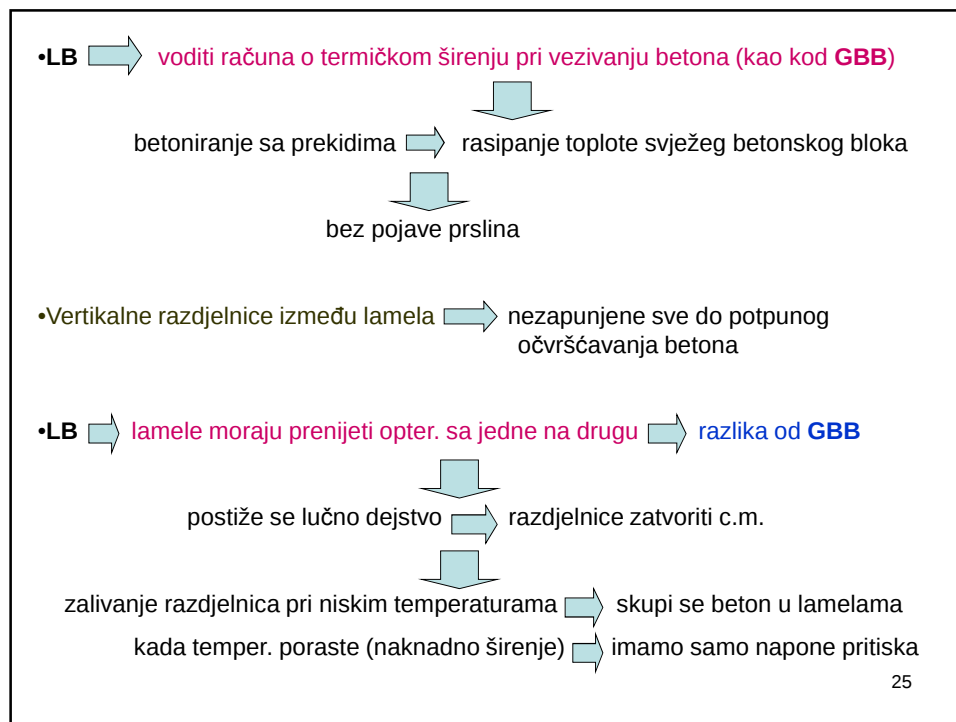
proračun koeficijenta sigurnosti protiv "iškoljkavanja"



razmatramo smicanje po složenim kliznim površinama u padinama doline



24



- LB → najmanje osjetljive na prelivanje



EO LB dimenz. na manji Q nego kod drugih brana

- LB → nisu ni najprikladnije za evakuaciju VV

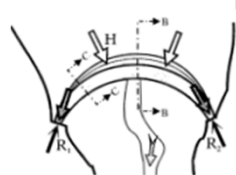
- LB → dio iznad prelivne ivice → luk je prekinut → taj dio "radi" kao kod **GBB**



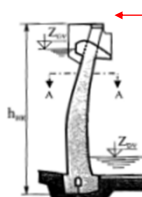
H prelivnog mlaza ne smije biti velika → radi ekonomičnosti konstrukcije



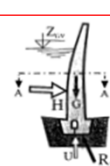
vitke LB → izbjeći prelive sa ustavama



Presjek A-A



Presjek B-B
(prelivni dio)



Presjek C-C
(neprelivni dio)

27

- Nekada nemoguće postići evakuaciju računskog Q na LB



zbog uskog pregradnog profila i uslova o ograničenju H prelivnog mlaza



razmotriti rješenje sa bočnim ili šahtnim prelivom ili sa tipom **GB**

- U tijelu brane imamo i "otvore" → galerije (injekcione, drenažne, pristupne)
cjevovodi za korisnike, cijevi tem. ispusta
ispusti za biološki minimum (ekološki Q)

- Položaj i veličina otvora → ne smiju izazvati nepovoljno stanje napona u LB

28

- **LB** ➡ treba oko **5x** manje betona nego kod **GBB** iste **H**
- **LB** ➡ uske doline sa čvrstim neispucalim stijenama ➡ **LB** dobro rješenje
 ↓
 najekonomičnije rješenje u odnosu na druge tipove brana
- Bitno ➡ složeni oblik kupole ➡ moguće povećanje troškova betoniranja
- Znatna cijena ➡ stabilizacija ili sanacija bokova doline ➡ ukoliko treba



29

Seizmičke sile

- Proračun preko **inercijalnih sila vode koje se prenose na branu**
 ↓
 inercijalne sile određivanje ➡ postupak Westergarda
 ↓
 uzimamo ih kao pridružene sile hidrostatičkom pritisku
- Kritičan udar ➡ u smjeru tetive luka na kruni **LB**



30

•LB ⇒ max. naprezanja u ravnima uzvodnog i nizvodnog lica uz pretpostavke:

- 1) brana homogeno i izotropno tijelo
- 2) između napona i deformacija ⇒ linearna zavisnost

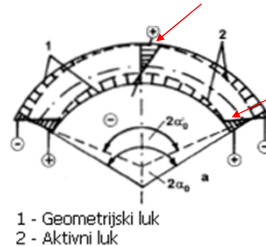


prihvatljivo do određene veličine naprezanja ⇒ zbog puzanja betona

- 3) modul elastičnosti kod napona pritiska i zatezanja je jednak

•Proračunima i kontrolama **LB dokazano**

-u horiz. presjec. (lukovima) uz napone pritiska imamo i napone zatezanja



Šema naprezanja luka

31

Savremene numeričke metode analize naprezanja i deform. lučnih brana

•LB ⇒ bilo koji tip ⇒ na vanjske sile reaguje kao prostorno tijelo

•LB ⇒ zakrivljena ploča promjenjive debljine



oslonjena po obodu i sa slobodnim gornjim rubom

•Najveća primjena ⇒ MKE i metoda konačnih razlika (manja primjena)



primjena ⇒ savremeni računari

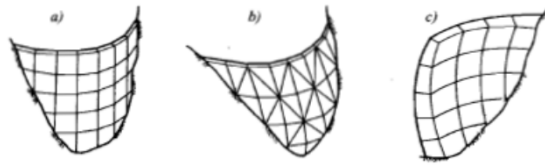


čvorovi mreže reprezentuju konturne uslove i samo opterećenje



potrebno znanje i iskustvo projektanta

32



Nekoliko modela MKE za LB:

a) pravougaoni elementi ; b) trougaoni elementi ; c) kubični elementi

- **Karakteristika MKE** $\Rightarrow$ algebarski proces $\Rightarrow$ rješavanja velikog broja j-na
j-ne linearne i nelinearne



nepoznati pomaci tačaka konstrukcije

- Opterećenje $\Rightarrow$ statičko i dinamičko
- **MKE** $\Rightarrow$ polazimo od približnog modela za koji tražimo tačno numeričko rješenje

33

- **MKE** $\Rightarrow$ proračun **LB** $\Rightarrow$ dobra aproksimacija oblika brane



lakše rješavanje problema konturnih uslova

- **Za matematski model definirati:**

- geometriju,
- osobine materijala u **LB** i temeljnom tlu,
- opterećenje (**G**, hidrostat. opt., uzgon, led, seizmika, termička opter.)

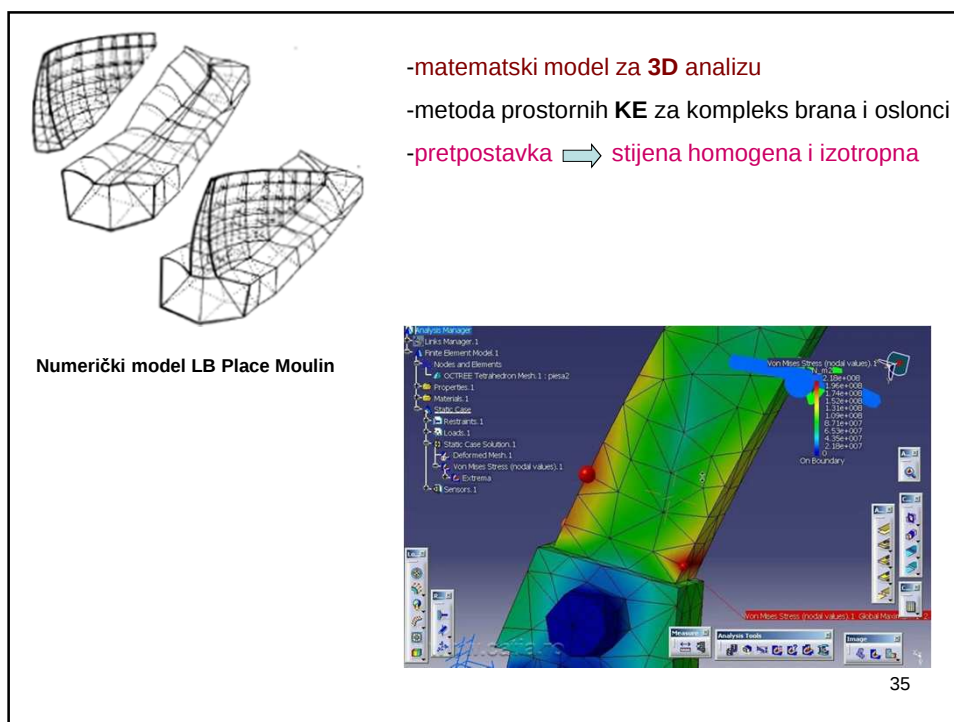


opterećenja mogu biti pojedinačna ili u kombinaciji opterećenja

Geometrija **LB** $\Rightarrow$ brana sa temeljom = **3D** zadatak

- MKE** $\Rightarrow$ praktične potrebe $\Rightarrow$ prikladna svim oblicima geometrijske idealizacije

34



• **Savremeni kriteriji dopuštenih napreznja LB:**

a) **Max. dopuštena tlačna napreznja**

Uobičajne kombinacije opterećenja $\sigma_{dop} \leq (0.20-0.25) \beta_{90}$

Ekstremne kombinacije opterećenja $\sigma_{dop} \leq 0.30 \beta_{90}$

β_{90} – tlačna čvrstoća betona nakon 90 dana na uzorku valjka 15x35 cm

b) **Napreznja u luku (pritisak)**

Bez uticaja temperature 6 MN/m²

Sa temperaturnim opterećenjem 7 MN/m²

c) **Napreznja u luku (zatezanje)**

Bez uticaja teperature 0,7 MN/m²

Sa temperaturnim opterećenjem 1 MN/m²

d) Naprezanja u konzoli (pritisak)

Bez uticaja temperature	6 MN/m ²
Sa temperaturnim opterećenjem	7 MN/m ²

e) Naprezanja u konzoli – uzvodno lice (zatezanje)

Max. NV bez uticaja temperature	0,7 MN/m ²
Max. NV sa temperaturnim opterećenjem	1 MN/m ²
Akumulacija prazna bez uticaja temperature	0,7 MN/m ²
Akumulacija prazna sa temperaturnim opterećenjem	1 MN/m ²

f) Naprezanja u konzoli – nizvodno lice (zatezanje)

Max. NV bez uticaja temperature	0,7 MN/m ²
Max. NV sa temperaturnim opterećenjem	0,7 MN/m ²
Akumulacija prazna bez uticaja temperature	0,7 MN/m ²
Akumulacija prazna sa temperaturnim opterećenjem	1 MN/m ²

37

Temelji lučnih brana

- Poboljšanje ispucalog stijenskog masiva → **injektiranje**

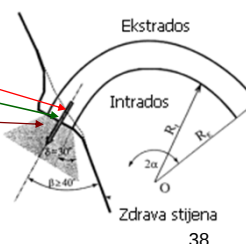


stvara se zona temelja koja se smatra kao proširenje temeljne stope

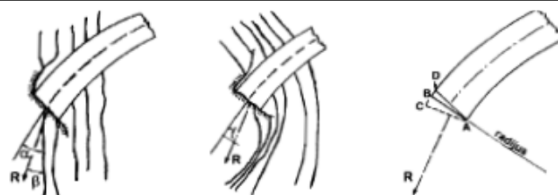
- Prenos sila sa tijela **LB** na stijenu → može i **prednapregnutim dugim sidrima**

- Iskustva → **bitni faktori:**

- ugao koji zatvara tangenta na osu luka sa izohipsama nizvodno od oslonca luka (α)
- ugao koji zatvara **R** sila sa izohipsom (β)
- ugao koji zatvara tangenta na osu luka sa **R** sila (γ)
- geometrijski oblik temeljne plohe
- linija oslonca → radijalna, neradijalna ili okomita na **R** sila



38



Odnos tangente; rezultujuće sile ;

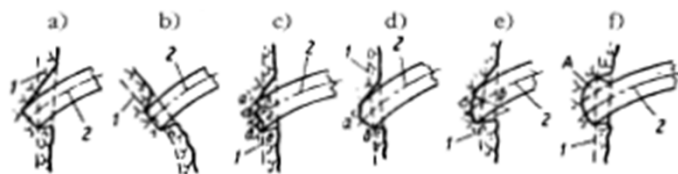
radijalna A-B ; neradijalna linija temelja A-D ; A-C linija temelja okomita na R silu



39

Neki oblici temeljne plohe (slika dole) → oblik temelja označen pod **c)** izbjegavati

oštri lomovi → pogodnost koncentracije naprezanja i loma



Geometrijski oblici temeljne plohe luka:

1 – granica stijene nepogodna za temeljenje ; 2 – luk

a) b) – radijalna linija temelja ; c) stepenasta linija ; d) poligonalna linija ; e) lučna linija

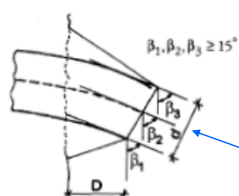
f) "grahorasta" linija (A – proširenje oslonake stope luka)

40

•Razne zemlje $\Rightarrow$ projektanti $\Rightarrow$ postavili iskustvene kriterije

za izbor **Df** i za oblik linije oslonaca **LB**

praksa $\Rightarrow$ geometrijski kriteriji i kriteriji **R** sile



Švicarski geometrijski kriterij

Ugao koji zatvaraju tangenta na ekstradosu, na osovini i intradosu luka i paralela sa izohipsom

mora biti **VEĆI** od 15°

41



Ruski geometrijski kriterij

Tangenta u tački presjecišta osovine luka sa izohipsom i izohipsa

moraju zatvarati ugao veći od 45°

•Dejstvo zemljotresa na površini mnogo > nego u dubini $\Rightarrow$ sa dubinom se smanjuje

vlastite vibracije gornjih slojeva 2 do 3 Hz $\Rightarrow$ veće dubine 0,07 Hz

•Seizmička područja $\Rightarrow$ dublje temeljenje **LB**

•**LB** $\Rightarrow$ najnepovoljnije $\Rightarrow$ ubrzanje zemljotresa u pravcu tetive luka na kruni **LB**

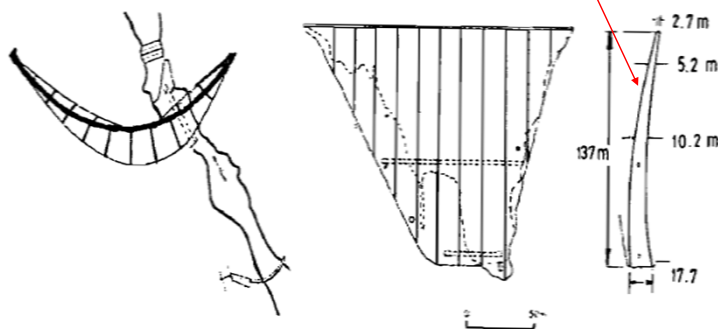
42

Geometrijske i konstruktivne karakteristike

- Teški uslovi temelj. $\Rightarrow$ projektanti postupno napuštaju kružni oblik hor. lučnih elem.

primjer **LB Gordon** (Australija)

$\Rightarrow$ eliptičan oblik



Lučna brana Gordon $H=137\text{m}$; $L=190\text{m}$

43

- Stalno istraživanje povoljnijih oblika **LB**

zbog prenosa sila na bokove $\Rightarrow$ napuštanje kružnog oblika hor. elemenata

primjer $\Rightarrow$ **LB Kanai** (Japan) $H=140\text{m}$ i $L=320\text{m}$ (u kruni)

$\Rightarrow$ paraboličan oblik

paraboličan oblik $\Rightarrow$ izbjegavanje pojave zatežućih napona na nizv. licu blizu krune



44

- Geometrijski kriteriji oblikovanja **LB** strožiji nego kod drugih brana



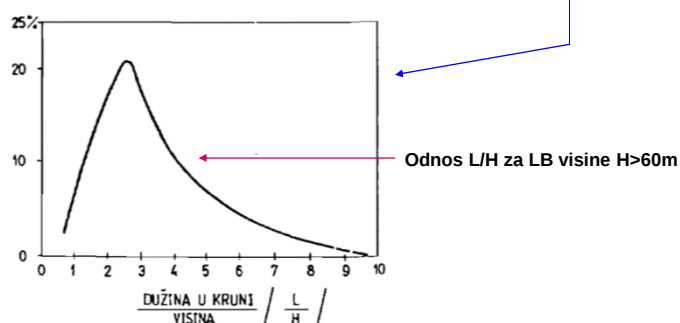
razlog $\Rightarrow$ lučno djelovanje ograničeno odnosom L/H

- Dijagram $\Rightarrow$ najveći procenat izgrađenih **LB** je sa odnosom L/H oko 3

- Što je odnos L/H veći $\Rightarrow$ **LB (konstrukcija) je smjelija !!!**

L – dužina u kruni **LB**

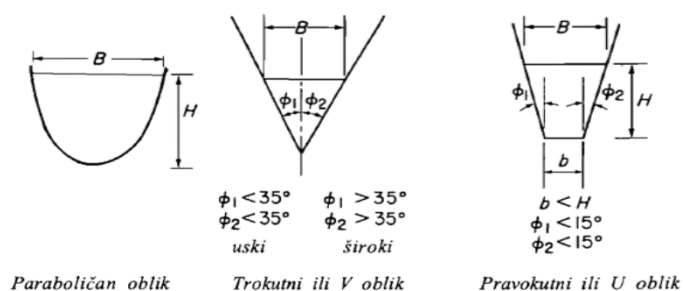
H – visina **LB**



45

- Topografski uslovi i oblik pregradnog profila $\Rightarrow$ bitna uloga pri oblikovanju **LB**

- Postoje oblici: paraboličan ; trougaoni ili **V** oblik ; pravougaoni ili **U** oblik ; kombinovani **U – V** oblik ; oblik "široka dolina" ; složeni oblik



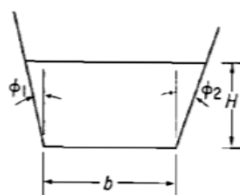
46

•Karakteristike pregradnog profila



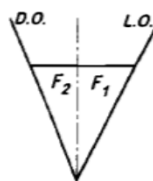
opisujemo odnosom B/H ; faktorom oblika ; faktorom asimetričnosti

$B/H < 3$ klinasti oblik; $3 < B/H < 6$ uska dolina; $B/H > 6$ široka dolina



Faktor oblika - K

$$K = \frac{b + H(\sec \phi_1 + \sec \phi_2)}{H}$$



Faktor asimetričnosti - $A_c = F_1/F_2$

$A_c > 1$, lijeva asimetričnost

$A_c < 1$, desna asimetričnost

Faktor oblika i faktor asimetričnosti

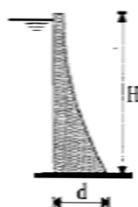
47

•LB $\Rightarrow$ postoji vitkost konzole ; vitkost luka ; ugaona (kutna) otvorenost luka

•Vitkost konzole $\Rightarrow$ odnos d/H $\Rightarrow$ d-debljina konzole u temelju



što je odnos d/H manji $\Rightarrow$ LB je vitkija $\Rightarrow$ na osnovu toga postoje LB:



$d/H \leq 0.20$ tankostijene,

$d/H = 0.20 - 0.33$ debelostijene,

$d/H = 0.33 - 0.65$ lučno - gravitacijske,

$d/H \geq 0.67$ gravitacijske.

48

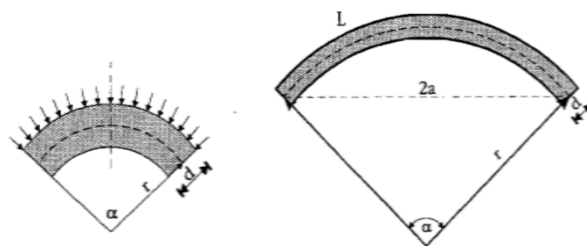
•Vitkost luka $\Rightarrow$ odnos $r/d \Rightarrow r$ – radius

$r/d=4$ do $5 \Rightarrow$ debeli lukovi $\Rightarrow$ gubi se lučno djelovanje po cijeloj L luka

•Debljina luka (d) $\Rightarrow$ smanjuje se povećanjem zakrivljenosti $\Rightarrow$ smanjenjem r

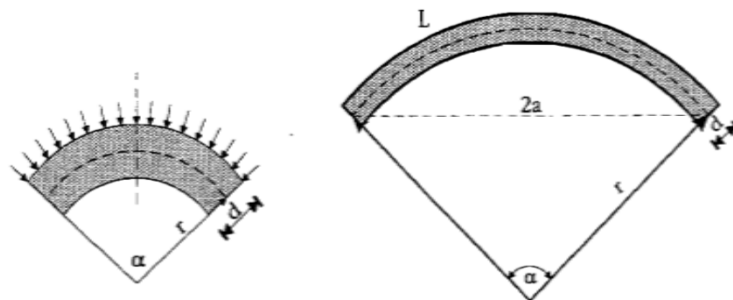
i povećanjem odnosa $L/r \Rightarrow$ do centralnog ugla $\alpha=133^\circ$

kada prekoračimo ugao $133^\circ \Rightarrow$ više gubimo na L luka nego što dobijamo na debljini



Vitkost konzole i luka

49



$$L = r \cdot \alpha, \quad \sigma = \frac{p \cdot r}{d}, \quad d = \frac{p \cdot r}{\sigma}, \quad F = L \cdot d = d \cdot r \cdot \alpha = \frac{p \cdot r}{\sigma} \cdot r \cdot \alpha$$

$$F = \frac{p}{\sigma} \cdot r^2 \cdot \alpha, \quad a = r \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, \quad F = \frac{p}{\sigma} \cdot \frac{a^2}{\sin^2 \frac{\alpha}{2}} \cdot \alpha$$

$$\frac{dF}{d\alpha} \rightarrow 0, \quad F \rightarrow F_{\min} \text{ za } \alpha = 133^\circ$$

50