

# MASIVNI HIDROTEHNIČKI BETONI



# MASIVNI HIDROTEHNIČKI BETON

- Masivni beton koji se ugrađuje u hidrotehničke konstrukcije ili konstrukcije većih dimenzija
- Beton u konstruktivnim elementima čija je najmanja dimenzija veća od 1 m i volumen veći od  $10 \text{ m}^3$  (prema HRN U.E3.010 )
- HRN EN 206-1 upućuje na potrebu pripreme zasebne norme za masivni hidrotehnički beton



# VRSTE BRANA

- Na velikim branama se ugrađuje i po nekoliko 1000 m<sup>3</sup>/dan betona
- Mjesečne količine ugrađenog betona iznose i do 300 do 400 tisuća m<sup>3</sup> betona na mjesec

*Gravitacijska brana*



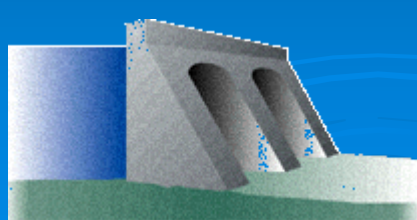
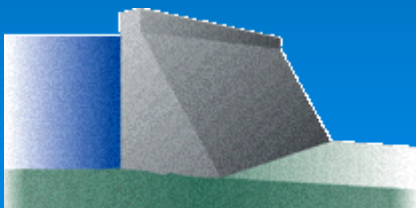
*Raščlanjena brana*



*Višelučne brane*

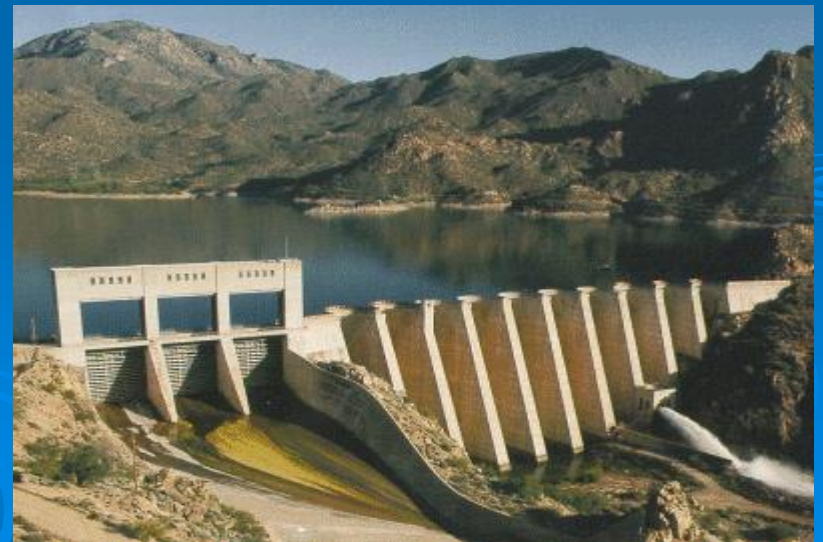
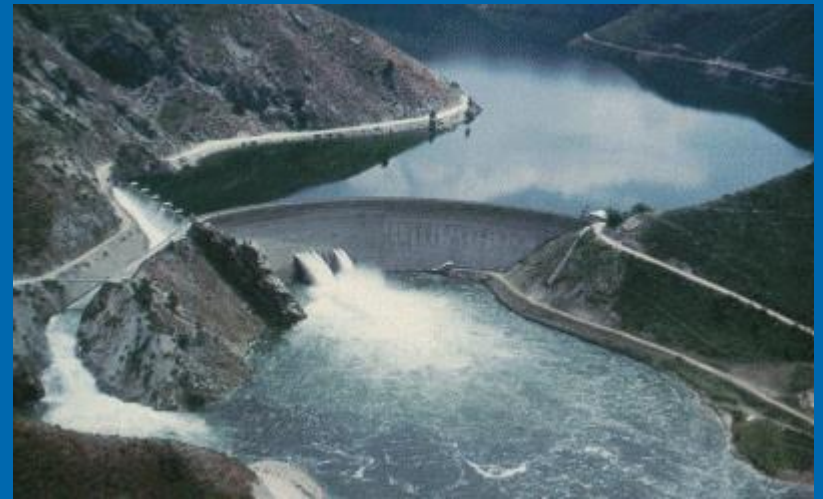


*Lučna brana*



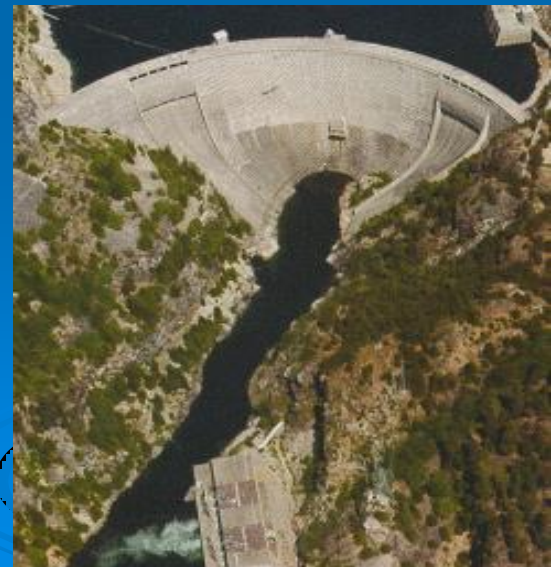
# MASIVNI HIDROTEHNIČKI BETON ZA GRADNJU BRANA

- Masivni beton kod brana i drugih hidrotehničkih objekata je svaki beton kod kojeg se zbog velikih dimenzija objekta pojavljuje potreba za provođenjem mjera minimaliziranja topline hidratacije cementa i provođenje mjera za sprečavanjem pojava termičkih pukotina



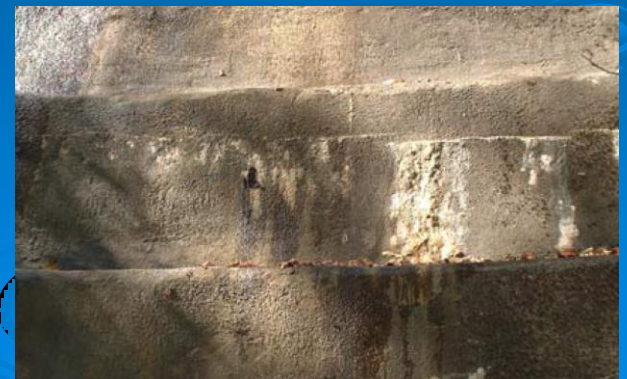
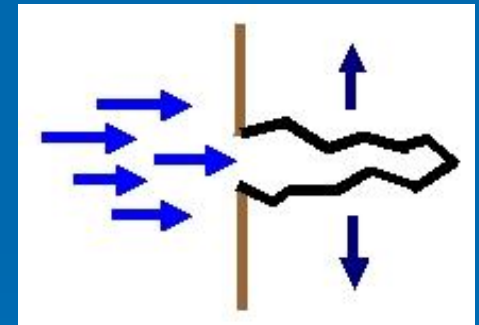
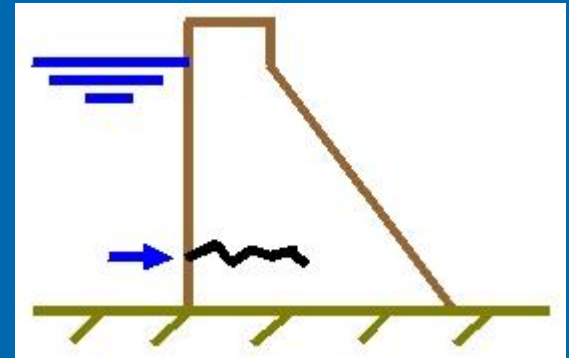
# MASIVNI HIDROTEHNIČKI BETON

- Podjela prema položaju u konstrukciji u odnosu na (HRN U.E3.010):
  - Razinu vode
    - Podvodni beton
    - Beton u području promjenljive razine vode
    - Beton iznad vode
  - Dimenzije
  - Tlak vode
  - Agresivnost vode kao okoliša

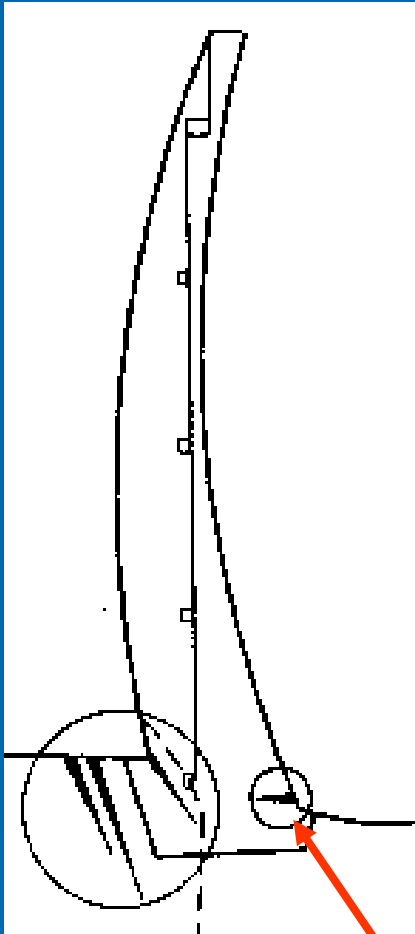


# MASIVNI HIDROTEHNIČKI BETON

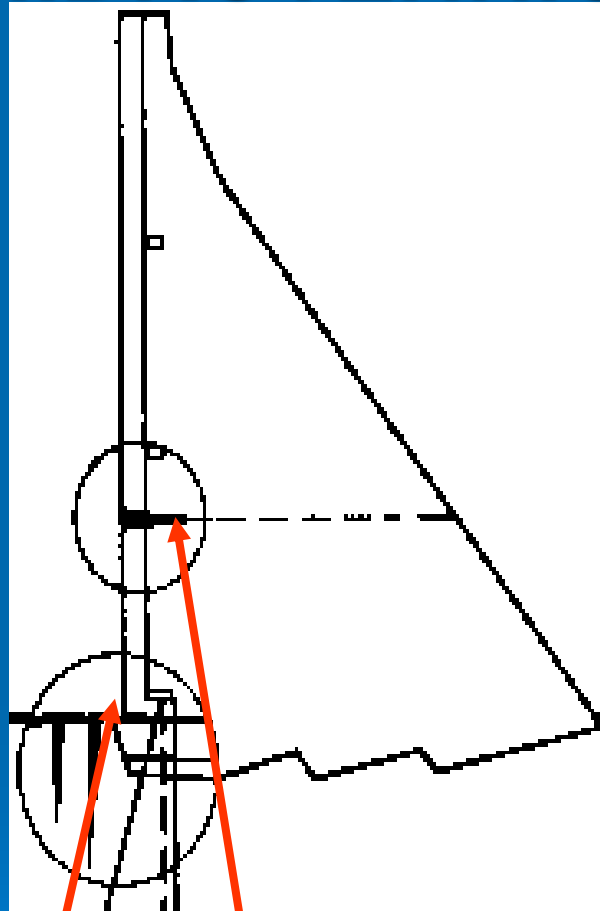
- Visoka unutarnja temperatura i temperaturni gradijent dovode do opasnosti od:
  - pojave pukotina i ugrožavanja vodonepropusnosti kao osnovnog uporabnog svojstva
  - gubitak konstruktivne cjelovitosti
  - skraćenje životnog vijeka konstrukcije
  - estetski nedostacima
- U Americi se preporuča temperatura svježeg betona od maksimalno 10 °C, maksimalna temperatura u betonu ne znatno veća od temperature okoline



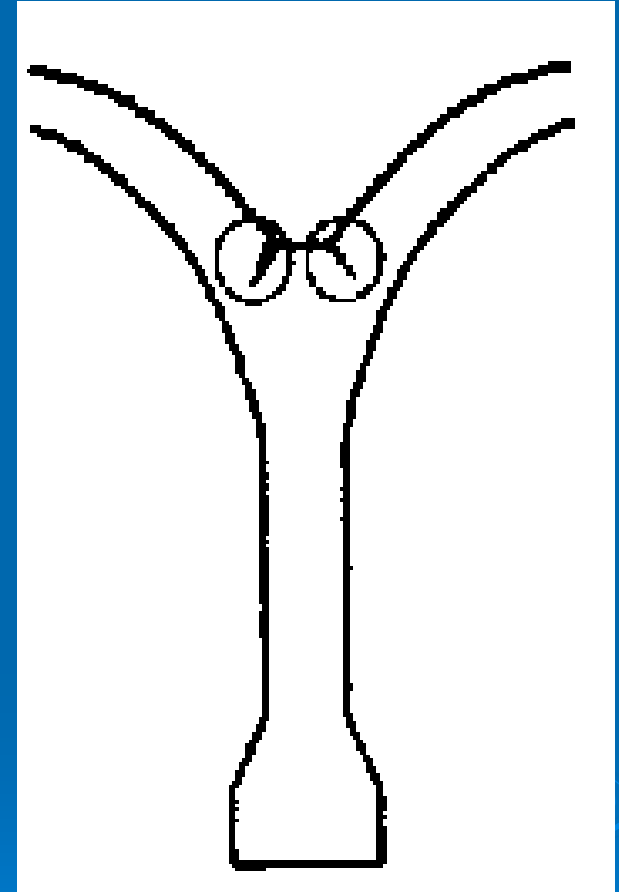
# PUKOTINE KOD HIDROTEHNIČKOG BETONA



Pukotine u temelju  
lučne brane



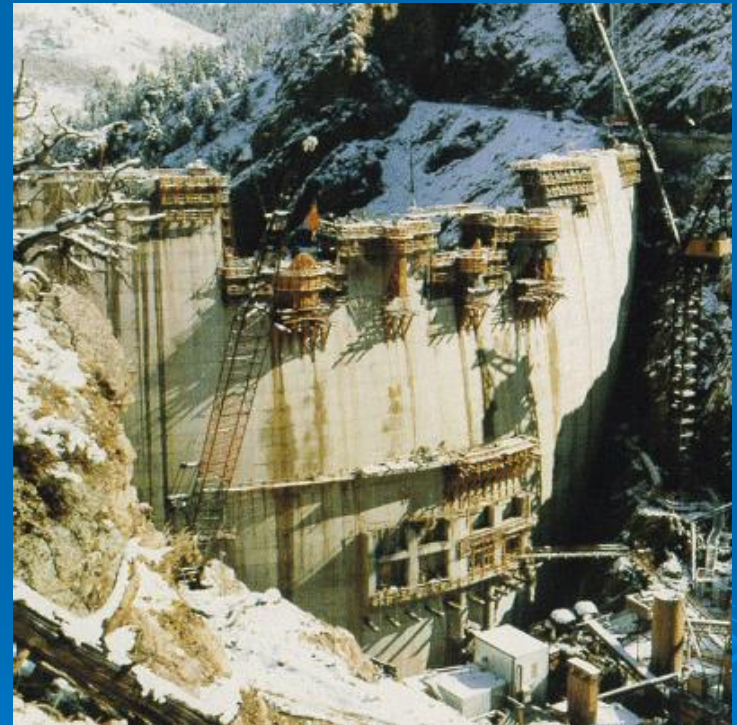
Pukotine u blizini temelja i  
na nizvodnoj strani  
gravitacijske brane



Pukotine u lukovima kod  
višelučne brane

# MASIVNI HIDROTEHNIČKI BETON

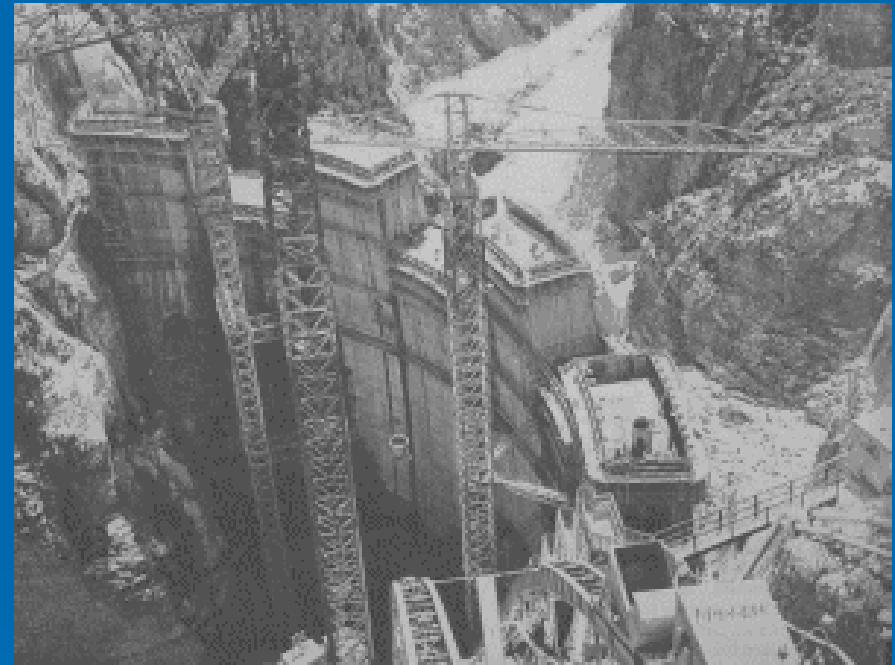
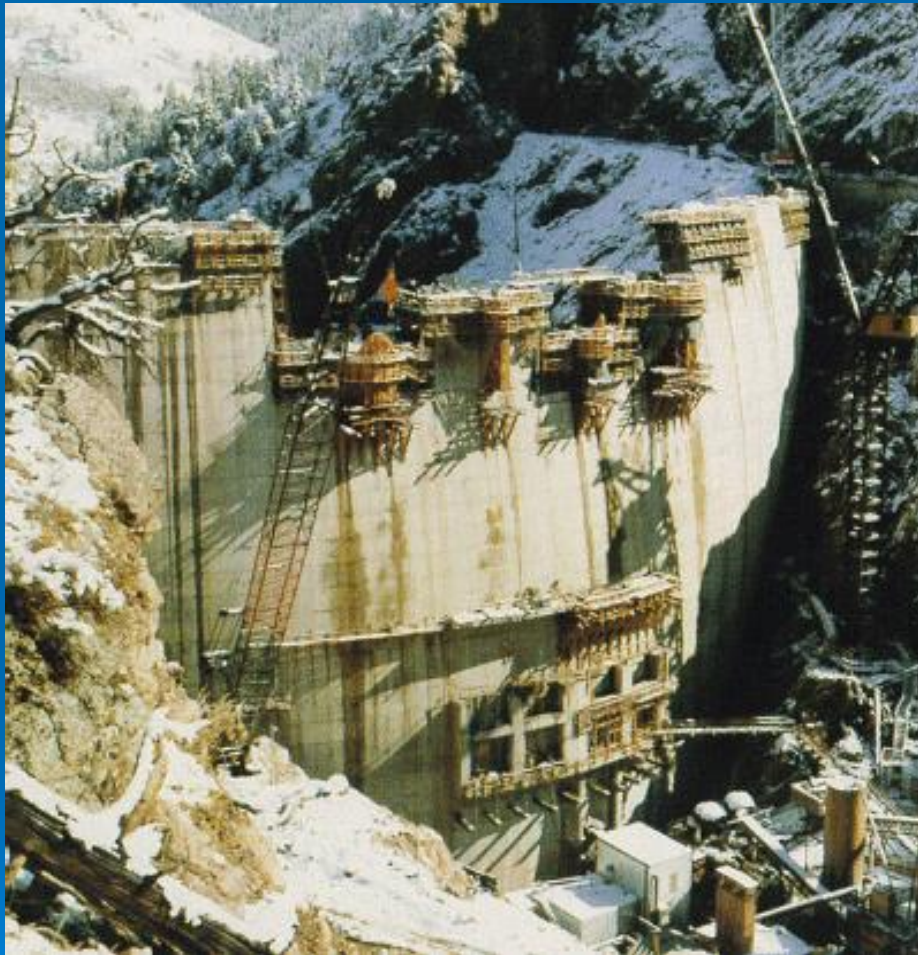
- Konstrukcijske mjere:
  - Izbor optimalnog konstrukcijskog sustava
  - Podjela konstrukcije na odsječke i blokove
  - Određivanje optimalnih dimenzija bloka
  - Primjena armiranog betona





# POSEBITOSTI GRAĐENEJA HIDROTEHNIČKIM BETONOM

- Znatno manje količine veziva i vode nego obični betoni
- Osjetljiviji na male promjene u granulometrijskom sastavu i na druge promjene sastava i temperature
- Održavanje obradivosti je stalan problem
- Nekad su hidrotehnički betoni bili u svježem stanju krute mješavine, zbijanje se vršilo uz velike utroške energije
- Danad se uz primjenu dodataka s malo veziva dobivaju obradljive, kohezivne i lako ugradljive mješavine



Betoniranje u blokovima ili kampadama

# MASIVNI HIDROTEHNIČKI BETON

- Tehnološke mjere:
- Cement niske topline hidratacije
  - Smanjenje količine cementa
  - Uporaba odgovarajućih aditiva
  - Krupnije zrno agregata
  - Sniženje početne temperature betona
  - Kvaliteno zbijanje betona
  - Zaštita površina od zagrijavanja, hlađenja i atmosferilija
  - Optimalno betoniranje blokova



# MASIVNI HIDROTEHNIČKI BETON

- Smanjenje količine cementa postiže se i uporabom agregata većeg maksimalnog zrna (125 ili 63 mm)
- Robustnija oprema za proizvodnju, transport i zbijanje betona (velikokapacitativne miješalice, transportne trake, baterije pervibratora)



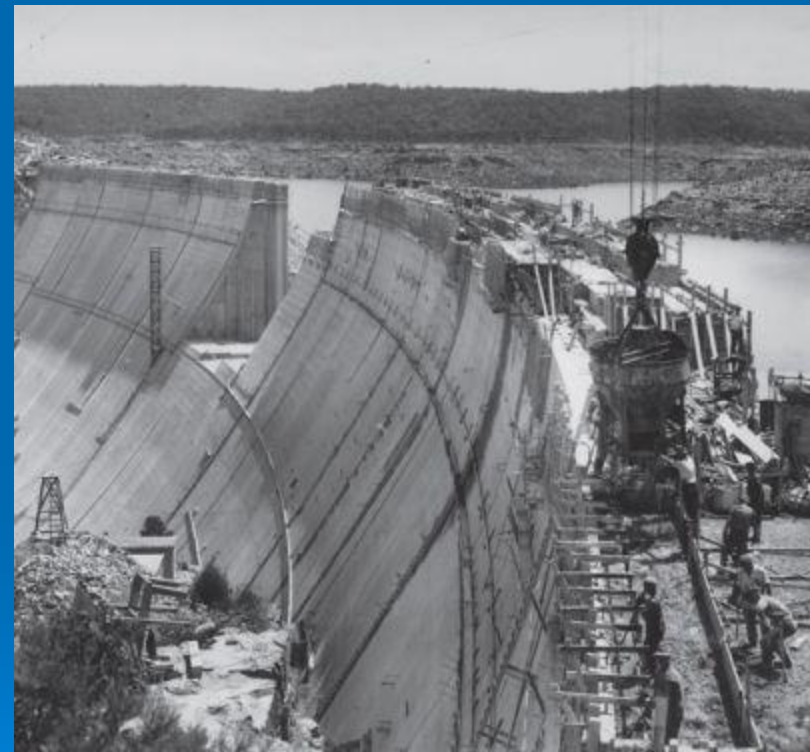
# MASIVNI HIDROTEHNIČKI BETON

- Uz poštivanje navedenih mjera čini se da beton hidrotehničkih građevina može specificirati, proizvoditi i kontrolirati sukladnost prema HRN EN 206-1
- Problematika specificiranja, kontrole i potvrđivanja vodonepropusnosti kao najčešće osnovnog svojstva, prijedlog prema njemačkoj praksi – prodor vode 50 mm prema HRN EN 12390-8



# OSNOVNI KRITERIJI KVALITETE HIDROTEHNIČKOG BETONA

- obradljivost
- niska toplina hidratacije
- odgovarajuća čvrstoća
- dimenzionalna stabilnost i minimum pukotina
- vodonepropusnost
- trajnost
- ekonomičnost



# SVOJSTVA – KAKO POSTIĆI?

- Za velike objekte poput hidrotehničkih nužna su opširna prethodna ispitivanja cementa, agregata, dodataka cementu i kemijskih dodataka, te svježeg i očvrslog betona
- Cilj prethodnih ispitivanja je pronaći najekonomičniji sastav betona koji zadovoljava tražena svojstva betona u konstrukciji (čvrstoća, termička svojstva, trajnost)
- S obzirom na veličinu konstrukcije kvalitetnim prethodnim ispitivanjima beton i kontrolom kvalitete tijekom izgradnje mogu se uštedjeti znatna financijska sredstva

# Svojstva potrebna za proračun konstrukcija od masivnog betona su:

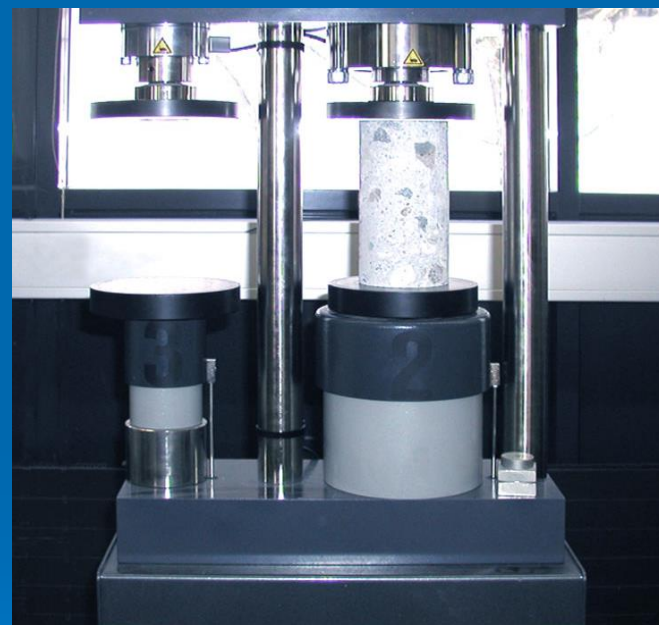
- tlačna čvrstoća,
- vlačna čvrstoća,
- modul elastičnosti,
- Poissonov broj,
- kapacitet vlačne deformacije,
- puzanje, volumne promjene uslijed sušenja,
- adijabatski porast temperature,
- koeficijent termičke ekspanzije,
- specifična toplina,
- termička vodljivost i
- difuzivnost, propusnost i trajnost



# TLAČNA ČVRSTOĆA

➤ Parametri koji utječu na tlačnu čvrstoću hidrotehničkog betona:

- Vodocementni omjer
- Kemijski sastav i finoća cementa
- Vrsta i količina pucolanskih dodataka cementu
- Tekstura i oblik agregata
- Kvaliteta i mineraloško-petrografsko podrijetlo agregata
- Granulometrijski sastav
- Korištenje kemijskih dodataka



# TLAČNA ČVRSTOĆA

- U branama se ne zahtijevaju visoke vrijednosti tlačnih čvrstoća betona (osim u tankim lučnim i višelučnim branama)
- Kod hidrotehničkih objekata se projektom zahtijeva tlačna čvrstoća nakon 90 dana, 1 ili 2 godine, a ne nakon 28 dana
- Razlog tome je da u ovom tipu konstrukcije beton biva opterećen pri većim starostima



# TLAČNA ČVRSTOĆA

- Tlačna čvrstoća se ispituje na uzorcima oblika valjka  $d/h = 150/300$  mm
- U slučaju većih zrna agregata može se dokaz tlačne čvrstoće provoditi i na većim uzorcima
- Tlačna čvrstoća na većim valjcima iznosi 80 do 90 % tlačne čvrstoće na valjku  $d/h = 150/300$  mm za istu starost betona



# TLAČNA ČVRSTOĆA

- Čvrstoća u većim starostima, naročito ako je dio cementa zamijenjen pucolanom ili zgurom, može biti 1,15 do 3 puta veća od 28 dnevne čvrstoće valjaka.
- Odnos čvrstoće betona u konstrukciji i čvrstoće na standardnim uzorcima je vrlo kompleksan (mehanika sloma), pa propisi (npr. US Bureau of Reclamation) dozvoljavaju maksimalna tlačna naprezanja u konstrukciji ne veća od trećine čvrstoće.

# VLAČNA ČVRSTOĆA

- Odnos tlačne i direktne vlačne čvrstoće nije linearan, a može se izraziti kao:

$$f_t = 0,32 \times f_c^{2/3}$$

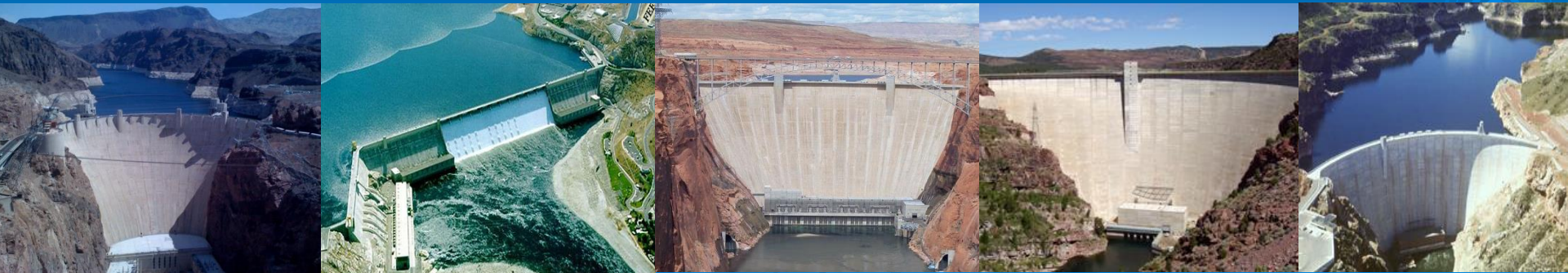
gdje je  $f_c$  tlačna čvrstoća, a  $f_t$  direktna vlačna čvrstoća

- Vlačna čvrstoća cijepanjem ili savijanjem ima drugi odnos s tlačnom čvrstoćom.
- Za različite vrste agregata, cementa i vodocementnog omjera, odnosi tlačne i vlačne čvrstoće mogu varirati u širokim granicama, pa je nužna provedba opširnih eksperimentalnih ispitivanja

# MODUL ELASTIČNOSTI POISSONOV KOEFICIJENT

- Vrijednosti modula elastičnosti nakon 28 dana su od 19 do 38 GPa, a nakon godinu dana 26 do 47 GPa
- Povećanjem vrijednosti tlačnih čvrstoća povećava se i modul elastičnosti
- Poissonov koeficijent iznosi od 0,16 do 0,20
- Raspon rezultata ispitivanja kreće se u granicama od 0,11 do 0,27
- Stabilno širenje pukotina počinje pri tlačnim naprezanjima koji su 35 do 50 % tlačne čvrstoće

Naziv brane	Tlačna čvrstoća (MPa) pri određenoj starosti u danima				Modul elastičnosti (GPa) pri određenoj starosti u danima				Poissonov omjer pri određenoj starosti u danima	
	28	90	180	365	28	90	180	365	28	365
Hoover	20,9	22,8	-	29,6	38	43	-	47	0,18	0,21
Grand Coulee	33,0	35,6	-	41,3	32	42	-	41	0,17	0,23
Glen Canyon	17,6	26,3	27,2	-	37	-	40	-	0,11	-
Flaming Gorge	20,3	24,1	26,7	32,3	24	30	32	-	0,13	-
Yellowtail	-	31,6	37,4	38,9	-	42	37	43	-	0,27



# VOLUMNE PROMJENE PUZANJE

- Puzanje betona obrnuto je proporcionalno njegovom modulu elastičnosti.
- Direktno je proporcionalno količini cementne paste i obrnuto proporcionalno krutosti agregata
- Volumne promjene masivnog betona nastaju uslijed promjena vlažnosti, promjena temperature, kemijskih reakcija i naprezanja od opterećenja
- Skupljanje uslijed sušenja masivnih betona je obično u granicama od 0,02% za mješavine s malo cementa do 0,10% za mješavine s više cementne paste ili s lošijim vrstama agregata.
- Termički koeficijent ekspanzije ovisi uglavnom o vrsti agregata i varira od  $7 \times 10^{-6}$  do  $12,5 \times 10^{-6}$  po  $1^{\circ}\text{C}$



# PROPUSNOST

- Propusnost ispravno projektiranih masivnih betona nikada nije u pitanju
- Problemi mogu nastati na mjestima nastavaka ili loše zbijenog ili segregiranog betona
- Malo se razlikuje za različite sastave betona



# TRAJNOST

- Najčešći uzroci narušavanja trajnosti masivnih betona su:
  - djelovanje niskih temperatura,
  - spriječene deformacije širenja i skupljanja od temperaturnih promjena i sušenja/vlaženja.
  - štetne kemijske reakcije mogu nastati od djelovanja kiselih voda, voda koje sadrže sulfate i izluživanja minerala djelovanjem mekih voda.



# KOLIČINA CEMENTA U SASTAVU

- Odabir količine cementa u masivnom betonu je mjerodavan u pogledu trajnosti, termičkih svojstava i obradljivosti, a manje s obzirom na zahtijevanu vrijednost tlačne čvrstoće
- Bitno je da se za betoniranje koriste cement niske i vrlo niske topline hidratacije, koji u svom sastavu imaju veću količinu mineralnih dodataka cementu
- Mineraloški sastav cementa treba imati što više  $C_2S$ , i što manje je moguće  $C_3S$  i  $C_3A$

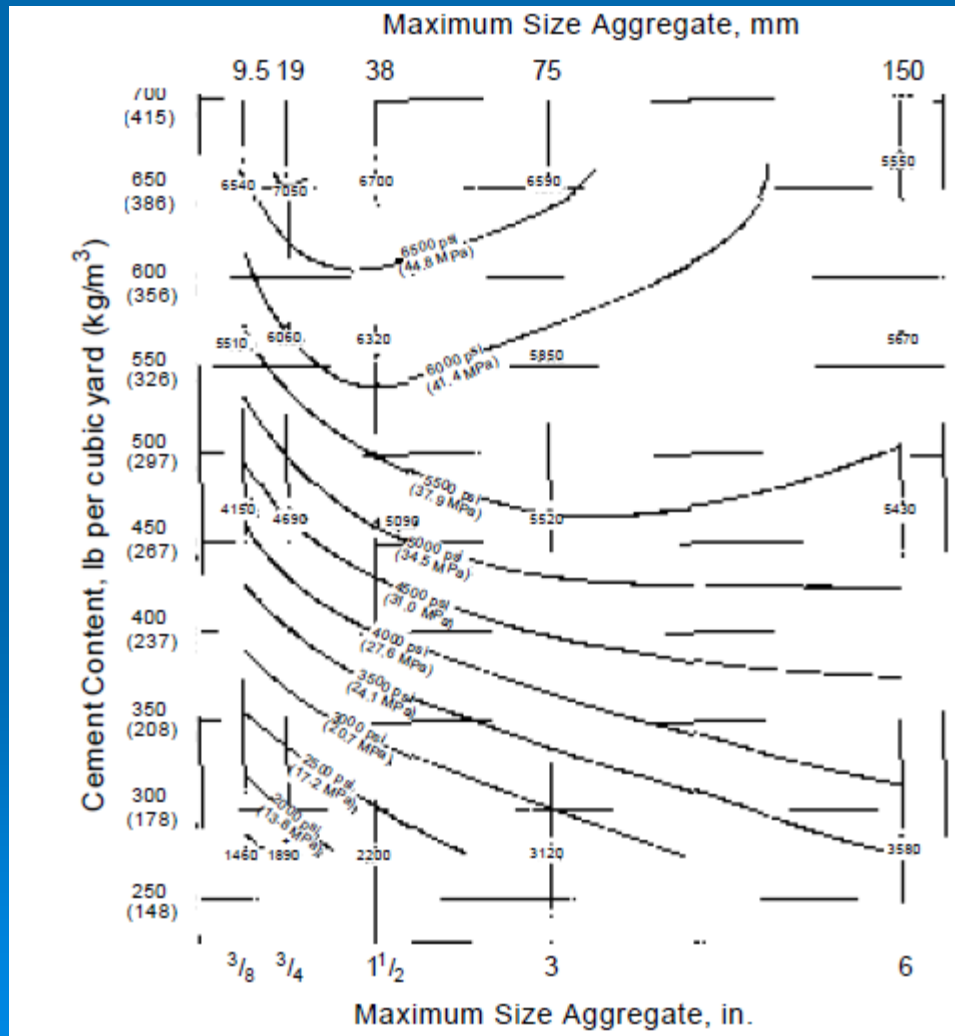
# KOLIČINA CEMENTA U SASTAVU

- Tijekom 1920ih i 1930ih pravilo struke je bilo da masivni betoni za brane sadrže cementa minimalno  $225 \text{ kg/m}^3$ , a preporučljivo je i ne manje od  $335 \text{ kg/m}^3$
- U tim objektima uočena su česta raspucavanja povezana sa razvojem topline hidratacije zbog prevelike količine cementa u sastavu
- Iz tog razloga danas su količine cementa uglavnom manje od  $200 \text{ kg/m}^3$ . Uz to se koristi i zamjena dijela cementa mineralnim dodacima koji smanjuju toplinu hidratacije.

# KOLIČINA CEMENTA U SASTAVU

Vrsta brane	Naziv brane	Godina izgradnje	Mjesto	Količina cementa (kg/m <sup>3</sup> )
Lučna	Glen Canyon Dam	1963	Arizona (USA)	167
Lučna	Morrow Point Dam	1968	Colorado (USA)	221
Lučna	El Atazar Dam	1972	Madrid	249
Lučna	El Cajon Dam	1984	Honduras	150-180
Gravitacijska	Detroit Dam	1952	Oregon (USA)	134
Gravitacijska	Libby Dam	1972	Montana (USA)	115
Gravitacijska	Solteira Dam	1973	Brazil	109

# UTJECAJ KOLIČINE CEMENTA I MAKSIMALNOG ZRNA AGREGATA NA TLAČNU ČVRSTOĆU



- Tlačna čvrstoća pri starosti od 1 godine ispitana na uzorcima oblika valjka 450x900 mm i 600x1200mm

# PUCOLANSKI DODACI U HIDROTEHNIČKOM BETONU

## ➤ Odabir se vrši na temelju:

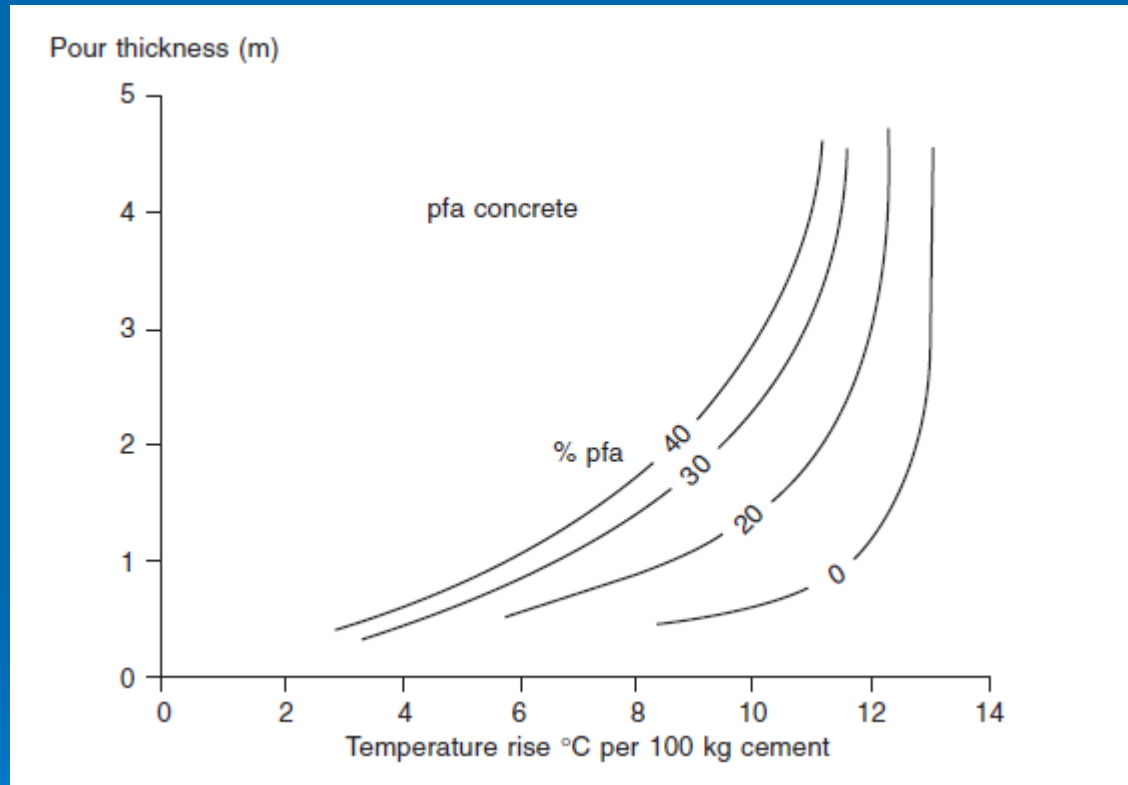
- Ekonomičnosti
- Smanjivanja topline hidratacije
- Poboljšanja obradljivosti
- Smanjivanja oštećenja od  
alkalnoagregatne reakcije i oštećenja od sulfata

## ➤ Ne smiju:

- Povećavati skupljanje od sušenja
- Bitno smanjivati rane čvrstoće
- Negativno utjecati na trajnost

## ➤ S obzirom da se zahtijevaju tlačne čvrstoće pri većim starostima betona veći dodatak pucolana je moguć

# LETEĆI PEPEO



Porast temperature u betonu u ovisnosti o količini letećeg pepela i minimalnoj dimenziji elementa

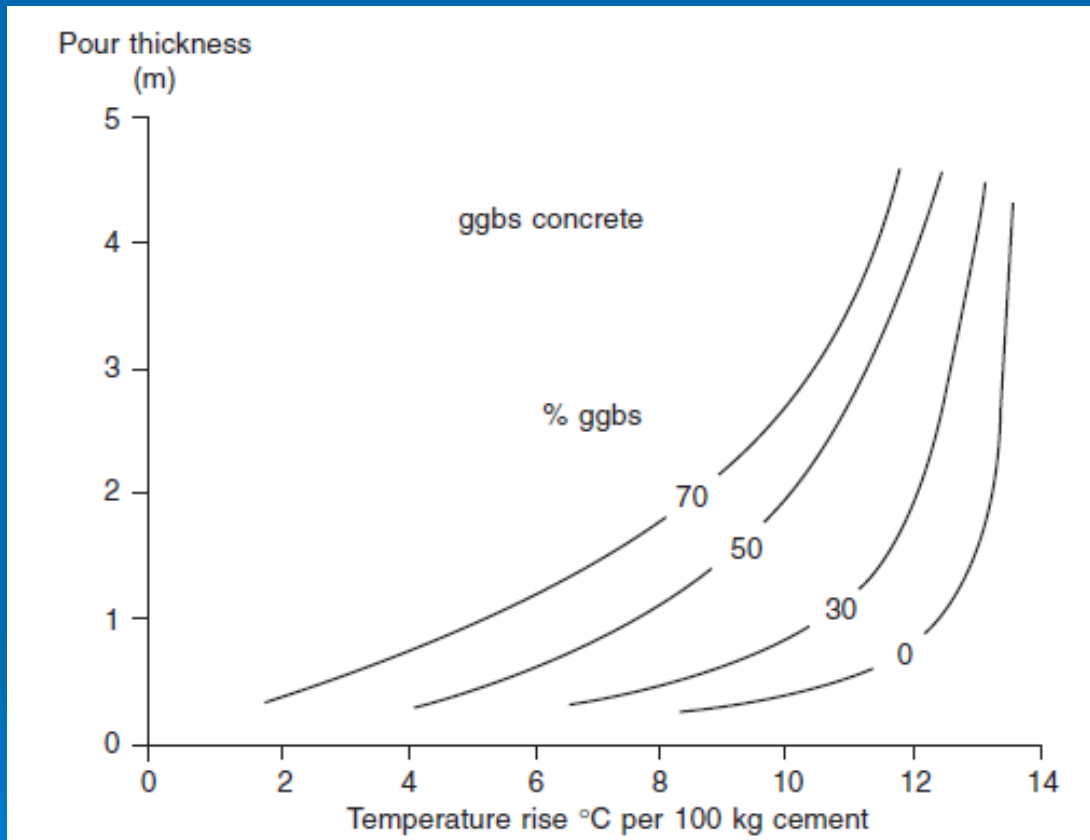


# ZGURA

- Da bi se postigla ista svojstva kao i sa dodatkom pucolana, zgura se koristi u bitno većim količinama od pucolana u hidrotehničkom betonu

<b>Dimenzija konstruktivnog elementa (m)</b>	<b>Minimalni udio zgure (%)</b>	<b>Minimalni udio letećeg pepela (%)</b>
do 1	40	20
1-1,5	50	25
1,5-2	60	30
2-2,5	70	35

# ZGURA



Porast temperature u betonu u ovisnosti o količini zgure i minimalnoj dimenziji elementa

# AGREGAT

- Uvjeti za maksimalno zrno agregata
  - ne smije biti veće od četvrtine minimalne dimenzije konstruktivnog elementa
  - ne smije biti veće od  $2/3$  minimalnog horizontalnog razmaka armature



# AGREGAT

- Najbolja obradljivost u svježem stanju postiže se korištenjem riječnog agregata
- Drobljeni agregat se u procesu proizvodnje može oblikom zrna i teksturom prilagoditi primjeni
- Obično se koriste kontinuirane granulometrijske krivulje, diskontinuirane se rabe kada postoji nedostatak jedne od frakcija
- Oblik zrna, tekstura i udio agregata ima povećani utjecaj na obradljivost svježeg betona



# AGREGAT

- granulometrijski sastav pijeska jako utječe na obradljivost masivnih betona
- pijesak se dijeli u dvije frakcije:
  - 0 – 1 mm + 1 – 4 mm ili
  - 0 – 2 mm + 2 - 4 mm.

## maksimalno zrno agregata

- gravitacijske mješalice (7 m<sup>3</sup> pa i više) - 90 mm, pa i do 150 mm
- prisilne mješalice maksimalno zrno agregata - 90 mm.

# AGREGAT



Pranje krupnog agregata na gradilištu

Prikladno je hladiti krupni agregat propuhivanjem, a teže je hladiti pijesak.

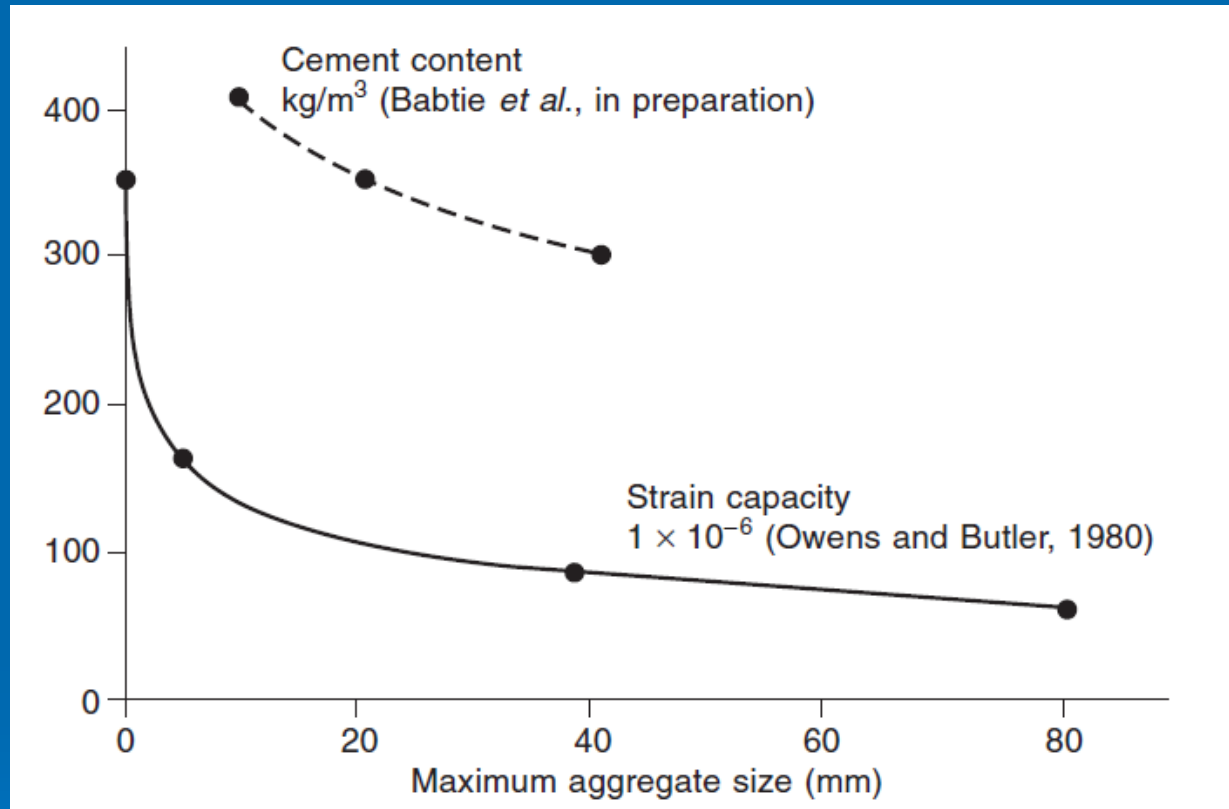
# AGREGAT

Maximum size in concrete, in. (mm)	Percentage of cleanly separated coarse aggregate fractions				
	Cobbles 6-3 in. (150-75 mm)	Coarse 3-1 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> in. (75-37.5 mm)	Medium 1 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> - <sup>3</sup> / <sub>4</sub> in. (37.5-19 mm)	Fine	
				<sup>3</sup> / <sub>4</sub> - <sup>3</sup> / <sub>8</sub> (19-9.5 mm)	<sup>3</sup> / <sub>8</sub> -No. 4 (9.5-4.75 mm)
6 (150)	20-30	20-32	20-30	12-20	8-15
3 (75)		20-40	20-40	15-25	10-15
1 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> (37.5)			40-55	30-35	15-25
<sup>3</sup> / <sub>4</sub> (19)				30-70	20-45

\*U.S. Bureau of Reclamation 1981.

Preporuke za omjer frakcija agregata u hidrotehničkom betonu koji omogućuje dobivanje svježeg betona zadovoljavajuće obradljivosti

# UTJECAJ MAKSIMALNOG ZRNA AGREGATA NA KOLIČINU CEMENTA U BETONU



- Maksimalno zrno agregata treba odabrati u ovisnosti o dimenzijama elementa i razmaku armature (ako postoji armatura)
- Povećanjem maksimalnog zrna agregata smanjuje se potrebna količina cementa u betonu, ali to s druge strane uvjetuje smanjenu deformabilnost betona i veću sklonost raspucavanju u okolini većih zrna agregata



# HLAĐENJE AGREGATA



# KEMIJSKI DODACI

- Poboľšanja koja se postižu kod hidrotehničkog betona:
  - Poboľšana obradljivost
  - Manji gubitak obradljivosti tijekom vremena
  - Smanjivanje topline hidratacije
  - Reduciranje pojava segregacije
  - Odgođen početak vezanja
  - Povećanje čvrstoće
  - Poboľšana trajnost
  - Ekonomičnost zbog manje količine cementa

# SUPERPLASTIFIKATOR U HIDROTEHNIČKOM BETONU

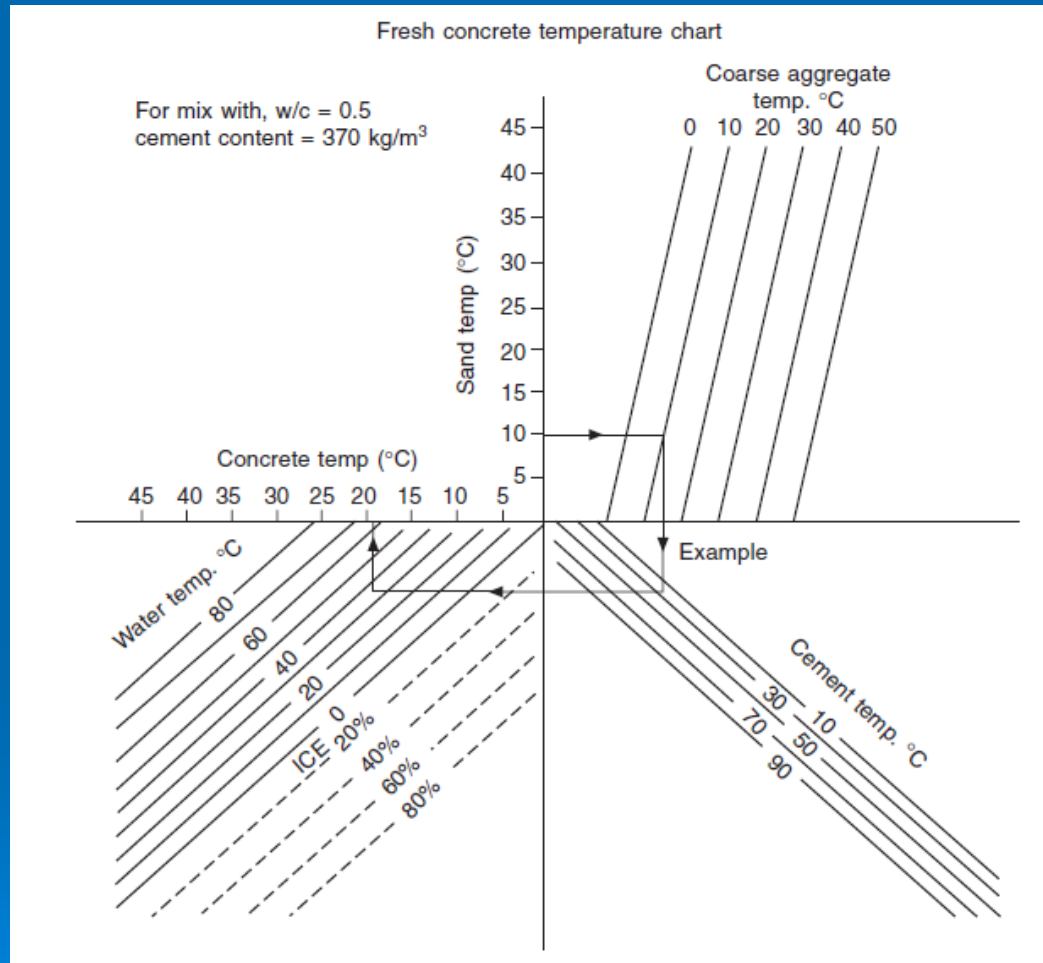
- Uobičajeno se ne primjenjuje u hidrotehničkim masivnim betonima, iako ima primjera gdje su korišteni
- Češće se koriste u slučaju armiranog hidrotehničkog betona
- Poželjni su u slučajevima gdje se ne može postići zadovoljavajuća obradljivost



# SASTAVI BETONA

Naziv brane	Vrsta brane	Godina	v/c omjer	D <sub>max</sub>	Sastav betona (kg/m <sup>3</sup> )					
					Cement	Leteći pepeo	Sitni agregat	Krupni agregat	Voda	Supeplastifikator
Dworshak (USA)	Gravitacijska	1972	0,59	150	125	42	439	1770	97	Ne
Libby (USA)	Gravitacijska	1972	0,68	150	88	29	536	1708	79	Ne
Crystal (USA)	Lučna	1976	0,47	75	231	-	492	1625	109	Da
R.B. Russell (USA)	Gravitacijska	1982	0,57-0,67	150	103-134	35-43	488-513	1741-1755	103-105	Da
Ilha Soteira (Brazil)	Gravitacijska	1974	0,75	150	82	27 (kal. glina)	468	1893	82	Ne
Itapu (Brazil, Paragvaj)	Gravitacijska	1982	0,70	150	108	13	582	1837	85	Ne
Peace Site I (Kanada)	Gravitacijska	1979	0,67	75	94	63	575	1549	101	Da
Roosvelt (USA)	Lučna	1995	0,53	100	128	32	566	1585	85	Da

# SVJEŽI BETON



Temperatura svježeg betona u ovisnosti o temperaturama komponenti sastava

# PRIPREMA POVRŠINE

**PRIPREMA POVRŠINE** prethodnog bloka betona za nastavak betoniranja:

- Nesmije biti udubljenja, naglih promjena visine,
- Površina treba biti dobro isprana bez zaostale prljavštine,
- Već po završetku prethodnoga bloka, 3 do 4 sata nakon poravnavanja površine, površina se ispere smjesom vode i zraka pod pritiskom.

# PRIPREMA POVRŠINE

- Ako je beton već očvrstnuo površina se očisti pjeskarenjem, po mogućnosti mokrim pjeskarenjem ili vodenim mlazom pod visokim pritiskom. Ovim tehnologijama skida se cementna skramica te se otvara struktura betona.
- Jednom očišćena površina ne smije biti dulje vremena izložena, jer dolazi do izluživanja vapna koje vrlo brzo s ugljik dioksidom iz zraka tvori kalcij karbonat, koji onda slabi vezu starog i novog betona

# PRIPREMA POVRŠINE

- Prije nanošenja novoga sloja betona površina mora biti bez ostataka slobodne vode preostale od ispiranja
- Za dobru vezu starog i novog betona, bitno da se prvi sloj vrlo pažljivo zbije vibriranjem uz površinu starog betona.





# TRANSPORT I UGRADNJA

- Transport i ugradnju treba uskladiti s mogućnostima ugradnje i zbijanja betona



- Teleskopske i zaokretne transportne trake za isplanirane slojeve



# TRANSPORT I UGRADNJA

- Debljina slojeva zavisi od efikasnosti vibratora, brzini dopremanja betona
- Treba osigurati nastavljanje sloja na sloj još svježeg betona,
- Osigurati revibriranje prethodnog sloja,
- Obično su debljine sloja ugradnje betona od 80 do 100 cm,
- Što su blokovi masivnog betona viši, manje je spojeva, tj slabih mjesta u konstrukciji

# UGRADNJA

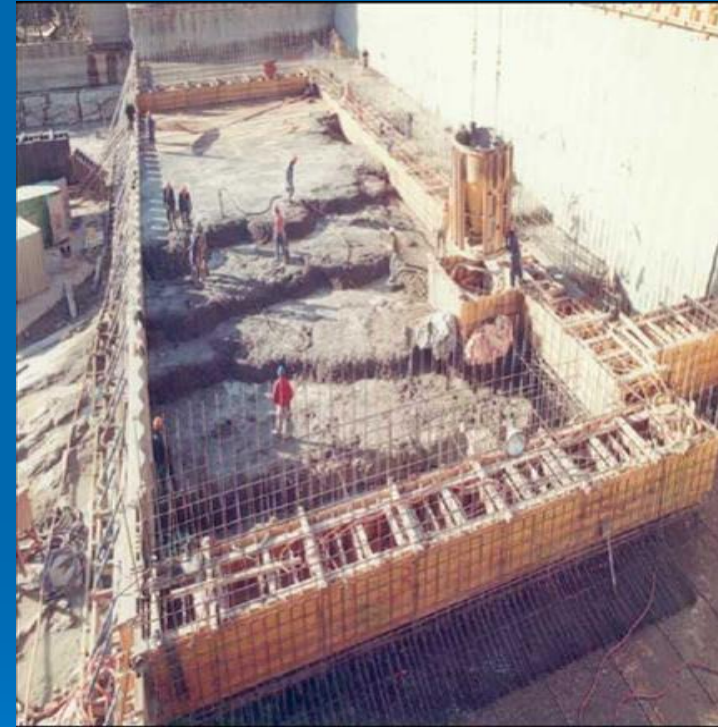


# UGRADNJA I VIBRIRANJE

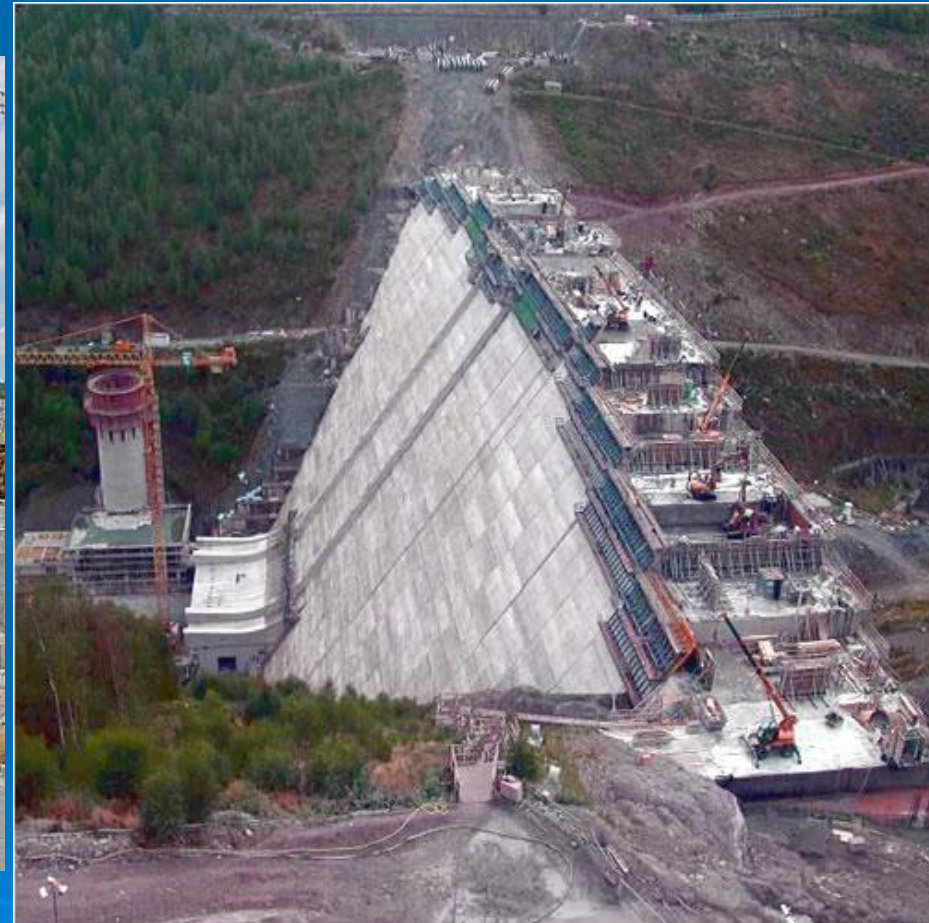


# TRANSPORT I UGRADNJA

- Slojevi betona trebaju se ugrađivati stepenasto, tako da jedna stepenica slijedi drugu na udaljenosti od cca 1,5 metra.
- Na taj način se prethodni sloj najbolje zaštiti od insolacije i onečišćenja, te osigura najbolje nastavljanje svježe na svježe.
- Beton treba vibrirati sve dok ne prestanu izlaziti veći mjehuri zraka.



# UGRADNJA BETONA U SEGMENTIMA (KAMPADAMA)



- Betoniranje se obavlja u segmentima (cik-cak princip) kako se spriječilo raspucavanje mladog betona zbog spriječenosti deformiranja

# NJEGOVANJE

- Pretjerano polijevanje hladnom vodom može izazvati temperaturni šok i površinske pukotine u betonu.
- Za površine betona koje su dulje vremena izložene djelovanju insolacije i vjetra prikladna je zaštita pomoću membrana.
- U oštrim klimatskim uvjetima, tj velikim promjenama temperature tijekom dana i noći potrebno je zaštititi beton od temperaturnog šoka.

# NJEGOVANJE

-Iznimno kada je visina bloka veća od 3 metra više nema većega značenja koliko će se vremena blok hladiti prije nego se na njega betonira sljedeći blok



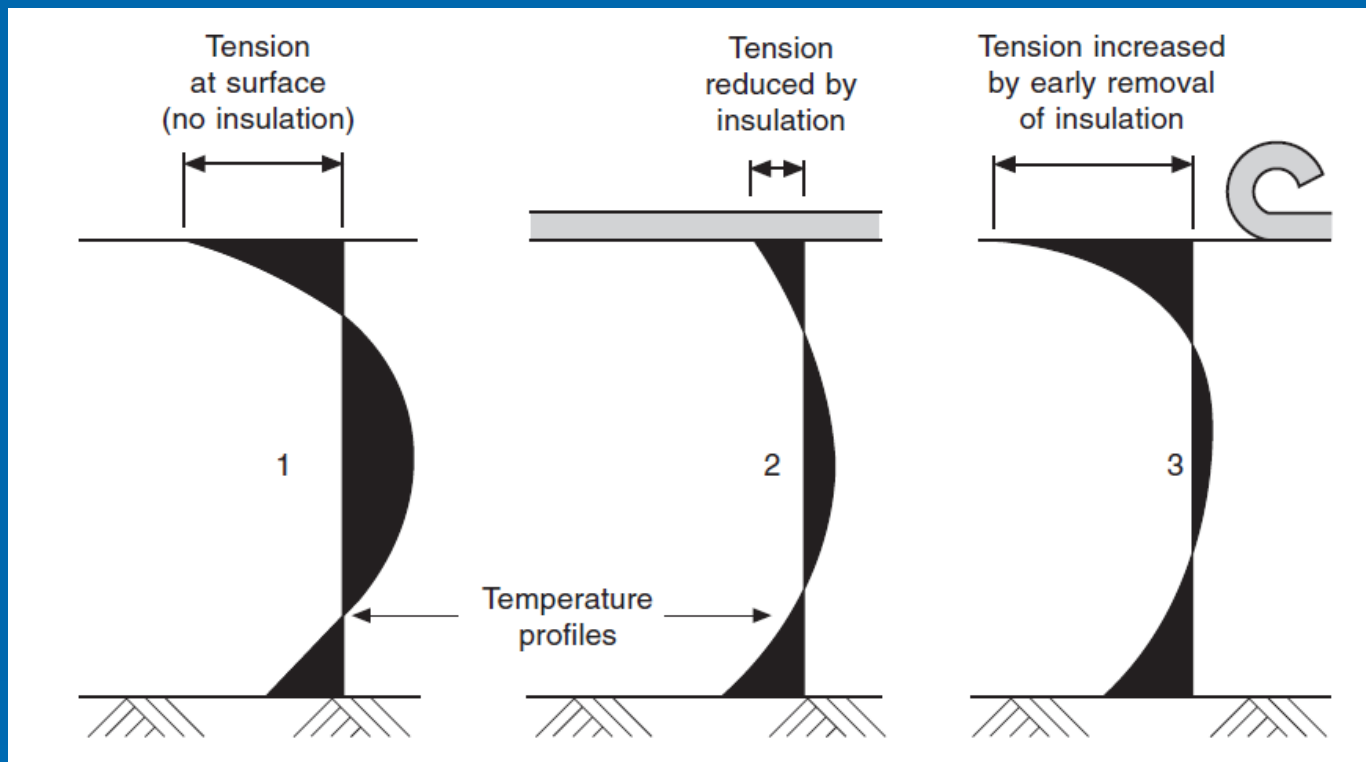


# NJEGOVANJE

Minimalna dimenzija elementa (m)	Minimalni period negovanja korištenjem termoizolacije (dani)
0,5	3
1,0	5
1,5	7
2,0	9
2,5	11
4,5	21

Skidanje termoizolacije se ne smije provesti naglo jer može doći do stvaranja velikog temperaturnog gradijenta

# NJEGOVANJE



Temperaturni profili betonskog elementa pri naglom skidanju termoizolacije

Skidanje termoizolacije se ne smije provesti naglo jer može doći do stvaranja velikog temperaturnog gradijenta