

**BETON (cementni)**, veštački kamen koji se stvara očvršćavanjem mase dobijene mešanjem vezivnog sredstva, tj. cementa, zrna tzv. agregata i vode, a po potrebi i drugih dodataka. Kao agregat se najčešće upotrebljava pesak, šljunak ili tucanik, ali za ovu svrhu mogu da služe i drugi materijali: zgura (topionička i kotlovska), azbest, otpaci opekarskih proizvoda, pa i druge neorganske i organske materije (drvna vuna, talasička, pozder i dr.).

Kao betoni, pored cementnog betona, važe i u analogni veštački proizvodi sa drugim neorganskim vezivnim sredstvima: krečnom, gipsom ili glinom, i sa agregatima najvećeg zrna krunpijeg od peska; u ovim, retkim slučajevima govorimo o krečnom, odnosno glinenom betonu, betonu od gipsa i t. sl. Ukoliko je, međutim, upotrebljen agregat krunpoće zrna peska, govorimo o malteru. Sa ovog gledišta, dakle, između betona i maltera postoji razlika samo u veličini maksimalnog zrna agregata.

Mešavine od organskih vezivnih sredstava, naročito bitumena i katrana, i kamenih sastojaka nazivaju se, u nekim slučajevima, takođe betonima. Tada je reč o betonima sa ugljovodoničnim vezivnim sredstvima, odnosno o *bitumenskim ili katranskim (terskim) betonima*. Ovakvi betoni mnogo se primenjuju za izradu kolovoza cesta.

Cementni beton nesrazmerno se više upotrebljava nego svи ostali betoni, a i oblasti i mogućnosti njegove primene daleko su šire. U ovom napisu podrazumevaće se pod rečju »beton«, u duhu naše prakse, samo cementni beton.

Beton se kao građevinski materijal upotrebljava za konstrukcije od nearmiranog betona (v. *Betonske konstrukcije*), za konstrukcije od armiranog betona (v. *Armiranobetonske konstrukcije*) i za prednapregнуте konstrukcije (v. *Prednapregnuti beton*).

Beton je bio poznat još u starom veku. O njemu govoriti rimski graditelji Vitruvius, koji je živeo u I. v. Na osnovu arheoloških nalaza može se utvrditi da je u starome Rimu, bar oko 200 godina pre naše ere, bio poznat beton, tj. veštački kamen, pod imenom *opus signinum*. Od ovog materijala je delimično izvedena i kupola rimskog Panteona, sačuvana do danas. Izrada betonskih konstrukcija u starom Rimu bila je moguća zato što su Rimljani poznali hidraulična vezivna sredstva, naročito prirođeni cement vulkanskog porekla koji se kopao na padinama Vezuva. O ovom materijalu govoriti i Vitruvius u drugom poglavljiju svog dela *De Architectura* kao o čudesnom prahu koji slepljuje kamenje, tako da se njime mogu da izraduju zidovi i u samom moru. Ma da su iz dočnjih stoljeća na teritoriji bivšeg zapadnorimskog carstva, pa čak i u Rajnskoj oblasti sačuvani mnogi betonski građevinski objekti, taj je način građenja u Srednjem veku sasvim napušten; tadanjim generacijama nije bilo poznato vezivno sredstvo više otpornosti koje bi odgovaralo starom rimskom cementu. Pronalaskom portlandcementa početkom XIX v. otpočela je nova era izrade betona, najpre skromnijom obimu. Posle pronalaska armiranog betona (Monier 1867) nastaje period sve veće i sve šire primene ovog materijala, koja još ni izdaleka nije dostigla svoju kulminaciju. Beton i betonske konstrukcije imaju u današnjem veku vidnu ulogu u materijalnoj kulturi savremenog društva.

**Vrste betona.** Najosnovnija podela betona odnosi se na njegovu zapreminsku težinu. Poznajemo *normalne ili teške betone*, zaprminske težine veće od  $1800 \text{ kg/m}^3$  i *lake betone*, zaprminske težine do  $1800 \text{ kg/m}^3$ .

Dalja podela betona vrši se prema raznim kriterijima, kao npr.:

1. Prema vrsti cementa. Razlikujemo beton od portlandcementa, metalurškog cementa, aluminatnog (boksitnog) cementa, pucolanskog cementa itd.

2. Prema prirodi agregata. Razlikujemo betone od smešte peska i šljunka, od tucanika (drobljenog kamena), zatim teške betone od topioničke zgure (šljake). Za lake betone dolazi u obzir još i ceo niz drugih agregata o kojima će još biti reči u ovom napisu.

Ponekad se betoni razlikuju i prema granulometrijskom sastavu agregata, te se prema karakteru tog sastava govoriti o betonima s agregatom kontinualnog ili diskontinualnog sastava, a

prema krupnoći maksimalnog zrna agregata o betonu sa finim, normalnim ili krupnim agregatima.

3. Prema količini vode. Ovaj kriterij dolazi do izražaja pri svežem, neočvrslom betonu u vidu tzv. konzistencije betona.

4. Prema otpornosti betona. Glavni pokazatelj karakteristične otpornosti betona, tj. njegove čvrstoće na pritisak, jest »marka« betona — garantovana standardna čvrstoća. »Privremeni tehnički propisi za beton i armiran beton« (1947) predviđaju za nearmirani beton standardne marke 70, 110, 160, 220, 300 i 380, a za armirani beton marke 160, 220 i 300, izuzetno i marku 400.

U obzir dolazi i izvesna druga mehanička otpornost betona čiji se pokazatelj ponekad navodi kao karakteristika betona. Tako se npr. govoriti o betonu veće otpornosti na zatezanje i o betonu otpornom na habanje (tvrdim betonima).

Karakteristika betona može biti i njegova nepropustljivost, koja se naročito zahteva za hidrotehničke objekte (hidrotehnički beton), kao i njegova osobina da je jača otpor prema mrazu i agresivnim hemijskim jedinjenjima (beton sa uvučenim vazduhom) ili je, pak, otporan prema vatri i dr.

5. Prema načinu izrade odnosno ugrađivanja razlikuje se ručno spravljeni beton (izuzetno primenjivan, slabog kvaliteta) od betona spravljenog u mešalicama, zatim ručno zbijeni od vibriranog, odnosno pervaibriranog betona, i betona pripremljenih specifičnim postupcima.

6. Prema specifičnom načinu izrade ili transporta. Izrađuje se »vakuum-beton«, centrifugirani beton, »torkret« (štrcani) beton, zatim tzv. blokirani (Prepakt) beton, »pumpani« beton, »transportni« beton i razni drugi; o njima će se docnije izneti neke pojedinstinosti.

7. Prema mestu izrade konstruktivnih elemenata razlikuje se gradilišni beton (kada se elementi betoniraju na licu mesta) i industrijski beton (za betonske elemente tvorničke proizvodnje).

#### SASTOJCI BETONA I NJIHOVA PRIPREMA

**Cement.** Za izradu betona dolazi u obzir ma koji standardni ili nestandardni cement ili drugo hidraulično vezivno sredstvo ako sporo (normalno) vezuje, tj. ako nije počeo vezivati u laboratorijskim uslovima u vremenu kraćem od  $1\frac{1}{2}$  sata računajući od momenta dodavanja vode (odnosno u vremenu određenom standardom), i ako mu druge bitne osobine (zapreminska postojanost, čvrstoća na pritisak i na savijanje) zadovoljavaju standardne zahteve. U nas se najviše upotrebljava portlandcement, zatim metalurški cement, cement sa zgurom i aluminatni (boksitni) cement. Dolaze u obzir i pucolanski cementi, supersulfatni cementi, aerizirani cement, zatim beli i raznobojni cementi, kao i neki drugi cementi koji se u našoj zemlji ne proizvode. Pre početka rada i povremeno u toku rada moraju se kontrolisati osobine cementa. Cement namenjen izradi betona mora na gradilištu biti smešten tako da je zaštićen od vlage, promaje i prekomernog zagrevanja; on ne sme da se stavlja neposredno na zemlju. Vreće cementa redaju se unakrst, i to najviše do visine  $\sim 2 \text{ m}$ . Treba omogućiti da vazduh cirkuliše oko naslaga vreća. Slagalište treba da je podešeno tako da se redovno mogu upotrebiti najpre one partije materijala koje su ranije isporučene. Kako cement počinje da vezuje pod uticajem vode, dakle i onda kad je izložen vlaži koja se nalazi u vazduhu, stvaraju se u vrećama najpre sitne, a docnije sve veće i čvršće grudvice. Da bi se to izbeglo, treba vreće cementa pri dužem ležanju u slagalištu povremeno premestiti na drugo mesto i, naročito zimi, proveravati da nije nastupilo

grudvanje. Grudvice se u početnom stadiju mogu ukloniti gnjećenjem celih vreća ili prosejavanjem cementa na situ od 900 otvora/cm<sup>2</sup>. One ni u kom slučaju ne smeju doći u beton (jer je to neaktivni cement koji je već vezao). Načelno, cement sa gradilišnih slagališta treba upotrebiti što pre. Opitima švajcarskog instituta EMPA dokazano je da cement koji u vrećama leži u slagalištu 6 meseci gubi 7,5 do 11%, a posle 12 meseci 13,5 do 15% svoje čvrstoće.

**Voda** za spravljanje betona može biti svaka pitka voda, a za nearmirani beton i morska voda ukoliko ne sadrži više od 3,5 % soli. Sumnjava voda (po mirisu ili izgledu) mora se hemijskim ispitivanjem proveriti u pogledu sadržine sulfata, hlorida i nitrata, kao i slobodnih mineralnih kiselina i organskih primesa, naročito šećera. Preporučuje se voda koja nije kisela, čija je sadržina sumpora (kao SO<sub>3</sub>) najviše 1% i koja ne sadrži više od 0,2% natrija i hlorova. Ne smeju se upotrebiti otpadne vode hemijske, kožne i šećerne industrije, ni otpadne vode koksara. Načelno se preporučuje da se upotrebljivost vode proveri paralelnim ispitivanjem betonskih probnih tela spravljenih kako sa sumnjivom tako i sa dobrom vodom. Negativna indikacija je, naročito, opadanje čvrstoće betona. Betoni sa boksinatnim (aluminatnim) cementom ne smeju se ni u kom slučaju spravljati sa slanom vodom.

**Dodatna sredstva.** U izvesnim slučajevima, naročito pri izradi masovnog betona, dodaju se prilikom spravljanja specijalna sredstva (aditivi), prašinasta ili tečna. Aditivi mogu dejstvovati hemijski (kao npr. kalcijum-hlorid) ili pak na fizičkoj osnovi (kao npr. dinaktivna sredstva); u potonjem slučaju ne utiču na proces vezivanja i očvršćavanja. Aditivi se obično dodaju betonu s nekom od niže nabrojanih svrha:

a) Postizanje bolje obradljivosti, tj. sposobnosti ugradivanja (oblikovanja) svežeg betona. Sredstvima zvanim »plastičatori« podstiče se tendencija vode da prilikom spravljanja betona prodre između veziva i agregata, time što se veštački smanjuje površinski napon vode. Ovim se omogućava veća štednja vode pri spravljanju, što vrlo pozitivno utiče na čvrstoću i na nepropustljivost očvrstog betona. Postupak je naročito primenljiv za amirane elemente malog preseka, ali i u drugim slučajevima.

b) Postizanje izvesnih specijalnih otpornosti, većih od onih koje beton normalno ima, kao što su: veća čvrstoća na zatezanje i na udar, otpornost na habanje, tvrdoća.

c) Postizanje vrlo gustog betona, otpornog prema agresivnim hemijskim uticajima, prema mrazu i vrućini, kao i otpornog prema radijaciji.

(O potonja dva slučaja daju se podaci u odgovarajućim poglavljima ovog članka).

d) Veštačko ubrzavanje vezivanja cementa (primenjuje se u industriji betonskih fabrikata) ili pak veštačko usporavanje vezivanja (u izvesnim slučajevima primenjuje na gradilištima).

e) Izrada obojenog betona uz dodavanje određene pigmentne boje, npr. crne, crvene ili žute železo-oksidsne, zelene hrom-oksidsne i plave manganske. U tim slučajevima upotrebljavaju se, po potrebi, beli cementi.

Stvarni uspeh dodavanja reklamiranih aditiva, naročito plastičatora, gdekada je sumnjičivo, te njihovu podesnost za ovu svrhu treba prethodno proveriti. Opreznost je na mestu naročito kada su u pitanju sredstva koja korozivno utiču na armaturu (CaCl<sub>2</sub> i druga), kao i sredstva čije dejstvo na beton nije poznato iz dugogodišnje prakse. Dodatna sredstva primešaju se betonu količinama prema uputstvima koja se s njima dobijaju; te količine obično su izražene u procentnom težinskom odnosu prema količini ugradenog cementa.

**Kameni agregat.** Od svakog kamenog agregata (peska, šljunka, tucanika, drobljenog kamena) zahteva se da zadovoljava niže navedene zahteve u pogledu osobinâ, a pri njegovom pripremanju treba da se primene dalje navedeni postupci.

**Petrografske karakteristike agregata.** Načelno je podesan agregat od postojane stene koja nije u stadiju raspadanja. Izuzima se kamenje koje notorno menja zapreminu kao što su: anhidrit, gips, konglomerati i peščari vezani glinom, zatim ugalj, lignit i negašeni kreč. Štetni minerali su i različiti sulfidi (pirit, markazit) ili sulfati. Sadržina SO<sub>3</sub>, po pravilu, ne treba da prelazi 1%. U novije vreme utvrđeno je da izvesni agregati, kao npr. granit i andezit, zatim filit, riolit, škriljac i selenit, a u manjoj meri

serpentin, feldspati i dolomiti, mogu da naprnsnu u gotovom betonu. Ovo se dovodi u vezu sa ekspanzivnom reakcijom izvesnih minerala, naročito silicijsko-magnezijskih, u prvom redu nekih vrsta opala, sa cementima visoke sadržine alkalija. Zbog toga se preporučuje da u takvim slučajevima sadržina alkalija (K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O) ne prelazi 0,5%. Ovo ekspanzivno dejstvo dolazi do izražaja tek posle izvesnog vremena, ponekad i više godina, i može se manifestovati nadimanjem betona i stvaranjem vidnih pukotina, naročito na masivnim konstrukcijama, npr. visokim branama. U agregatu, dalje, ne sme biti u većoj količini kamenih zrna u stanju raspadanja, ni gvožđevitih sastojaka.

**Oblik i površina zrna.** Preporučuju se zrna približno loptastog oblika, a treba izbegavati pločasta i igličasta zrna. Pri upotrebi ivičastih zrna gdekada je preporučljivo da se sitne frakcije, do krupnoće 4 mm, zamene oblim zrnima (rečnim peskom). Ivičastim zrnima veće krupnoće daje se preim秉stvo ispred oblih kada se želi postići veća čvrstoća na zatezanje. Površina zrna ne treba ni da je suviše hrapava (jer iziskuje višak vode), niti suviše glatka-staklasta (jer smanjuje prianjanje cementnog lepa za kamen).

**Vlažnost agregata** se stalno menja, zavisno od vremenskih prilika i načina čuvanja agregata; poznавanje ove osobine bitno je pri određivanju količine vode za spravljanje betona. Vlažnost se može odrediti na taj način da se određena količina prosečnog materijala — najmanje 5 kg — suši u peći, sušnici ili na jakom suncu, sve dok se težinskim merenjem ne utvrdi da se težina više ne menja. Vlažnost agregata je razlika između težine materijala pre sušenja ( $T_{v1}$ ) i posle sušenja ( $T_s$ ), izražena u procentima u odnosu na suvi materijal, prema jednačini

$$v_1 = \frac{T_{v1} - T_s}{T_s} \cdot 100\%.$$

U pogledu čistoće agregata postavljaju se tri zahteva:

1. U pesku ne sme biti organske nečistoće, naročito humusa, u većoj meri. Ispitivanje podesnosti sa ovog gledišta vrši se obično po Abrams-Harderovoj metodi. U staklenu bocu stavlja se pesak do crte koja označava sadržinu 130 cm<sup>3</sup>, zatim se do 200 cm<sup>3</sup> naspe 3% tni rastvor NaOH. Boca se snažno protrese i ostavlja da stoji 24 sata. U slučaju prisustva humusa rastvor natrijeve lužine se oboji, a intenzitet pojavljenje boje služi kao kriterij. Agregat je čist ako je tečnost bezbojna ili svetložuta; upotrebljiv ako je žuta do smeđežuta, sumnjiv ili neupotrebljiv ako je tamno obojena.

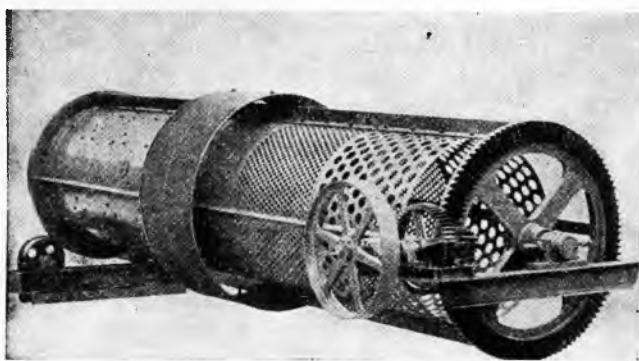
2. Zrna peska i šljunka ne smeju biti obavijena nečistoćom u vidu skramice (opne) koja sprečava spajanje pojedinih čestica u tehničku celinu.

3. Agregat (pesak, šljunak, tucanik i dr.) ne sme biti zamuljen. Kao muljeviti sastojak smatra se sav prašinasti materijal koji prolazi kroz standardno sito od 4900 otvora/cm<sup>2</sup>, dakle zrna krupnoće do ~ 0,1 mm. Ova najfinija zrna agregata zahtevaju uvećane količine cementa (»žderaći cementa«) i vode, te mogu bitno smanjiti čvrstoću betona u odnosu na adekvatne smeše krupnijih zrna. Fini glineni prah, sem toga, sprečava uzajamno spajanje cementnih zrna, odnosno cementa i agregata. Zbog toga se glinenog mulja ne dopušta više nego 2% od težine celokupnog agregata; krečnjačkog i silicijskog mulja može biti i do 3%. Pitanje sadržine mulja predstavlja znatan problem u savremenoj tehnologiji betona, naročito kada se radi o betonu krupnih, masivnih konstrukcija.

Muljevitost se ispituje ispiranjem agregata, najbolje vrućom vodom, sve dok se ne pojavi potpuno bistra voda. Procenat mulja utvrđuje se težinskim merenjem posle taloženja ili filtriranja zamuljene (nečiste) vode, sušenja taloga i njegovog prosejavanja na situ od 4900 otvora/cm<sup>2</sup>. Zamuljenost se može približno utvrditi tako da se u menzuru sadržine 1 litra saspe 500 g agregata, a zatim se do 3/4 njene sadržine naspe voda; sve se snažno protrese i ostavi da stoji 2 sata. Muljeviti sastojci izdižu se i obrazuju nad osnovnim materijalom tanak sloj koji se jasno razpozna. Pomoću obrasca

$$T = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \Delta h$$

dobiva se težina mulja iz izmerene visine ( $\Delta h$ ) tog sloja. Pri tome



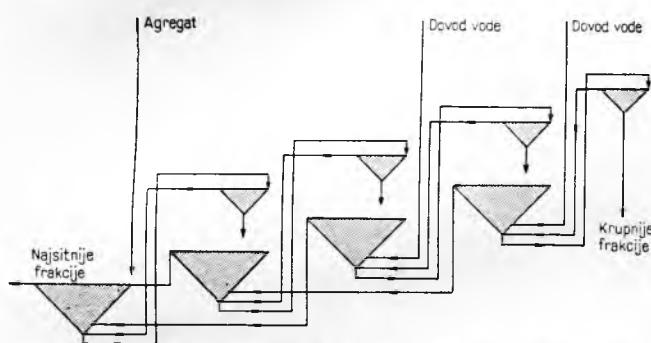
Sl. 1. Mašina za pranje i prosejavanje betonskog agregata (»Fiorentini«)

je  $d$  prečnik menzure, a pretpostavlja se da zapreminska težina razvodnjenog mulja iznosi 1.

Aggregat sa većim procentom mulja mora se pre upotrebe prati u podesnim mašinama. Nestručno pranje kojim se potpuno ispiraju potrebna sitnija zrna ili pak stvara blato, štetno je.

Savremenim mašinama može se, pored pranja, provesti i prosejavanje aggregata u izvestan broj frakcija. Na sl. 1 predstavljena je mašina za pranje aggregata, proizvod »Fiorentini«.

Noviji, daleko savršeniji način odstranjivanja mulja određene frakcije (npr. do 0,03 ili 0,06 mm ili pak do 0,15 mm) predstavlja pronalazak Austrijanca Edera, poznat pod imenom *Rheax*. Postupak se zasniva na kombinovanom verticalnom i horizontalnom ispiranju mulja i praha vodom, a podesan je za odvajanje pojedinih frakcija do krupnoće zrna 0,15 ili 0,4 mm. Na sl. 2 prikazana je shema horizontalnog ispiranja aparatom *Rheax*.

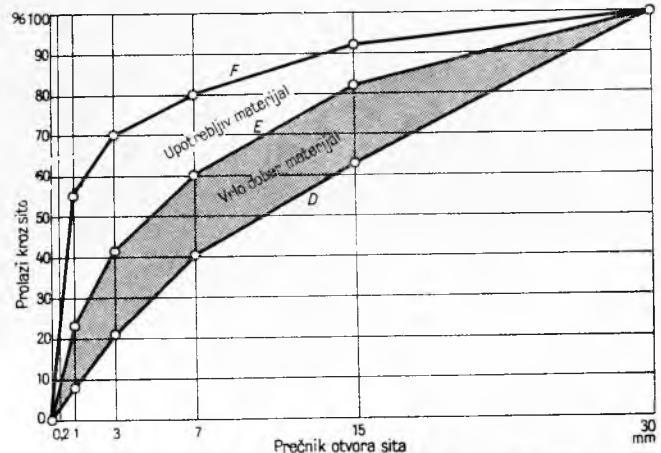


Sl. 2. Shema aparature »Rheax« sa horizontalnim sistemom ispiranja

*Granulometrijski sastav*. To je sastav aggregata po krupnoći zrna, izražen podacima dobijenim njegovim prosejavanjem na sedam raznih propisanih otvora. *Granulometrijski sastav* izražava se tablicom prosejavanja i krivom prosejavanja koja prikazuje prosevak, u procentima težine, kao funkciju otvora sita.

Potreba za utvrđivanjem granulometrijskog sastava proizlazi iz činjenice da kameni aggregati, ma koga karaktera, ne pokazuju ni ujednačen ni stalan sastav po krupnoći zrna, a naročito ne takav koji daje optimalnu čvrstoću betona ili druge optimalne osobine. Ovo je već u početku jačeg razvoja amiriranog betona dovelo do spoznaje o potrebi da se sastav aggregata u pogledu krupnoće zrna i uzajamnog odnosa količina pojedinih njegovih frakcija veštacki poboljša, sa ciljem da se postigne optimalna čvrstoća gotovog betona. Podstrek za primenu ovog načela dali su radovi američkih istraživača Fullera i Thompsona, objavljeni 1907, na osnovu kojih je konstruisana *Fullerova kriva*, tj. kontinualna linija u dijagramu prosejavanja koja predstavlja udeo po

težini svih veličina zrna cementa i aggregata u betonskoj smeši koja, pri određenim uslovima izrade, daje optimalnu čvrstoću gotovog betona. Fuller je dao podatke za 3 vrste aggregata (pesak i šljunak, pesak i drobljeni kamen i u celosti drobljeni agregat). Ove 3 linije se među sobom neznatno razlikuju. Zato se često, za ma koji slučaj, uzima Fullerova linija prema sl. 3. U ovoj liniji, koja je u početku elipsasta pa se zatim tangencijalno produžava, izražen je zakon prema kome u dobroj betonskoj smeši treba da su u određenom odnosu sadržane sve frakcije aggregata, od nule do zrna maksimalne krupnoće. Docnjim radovima Otzena i Grafa, pa radovima Fereta, Fauryja, Bolomeya, Roša i drugih, korigovane su ove postavke utoliko što je utvrđeno da beton sastavljen prema



Sl. 4. Grafove linije granulometrijskog sastava prema DIN 1047

Fullerovo liniji ne predstavlja uvek materijal maksimalne gustine i čvrstoće.

Fullerovo liniji se od strane prakse zameralo i to što ona, pored aggregata, sadrži i zrna cementa, a budući da količina cementa u betonu može znatno da varira (od 150 do preko 400 kg u m<sup>3</sup>), potrebno je da se za svaku moguću količinu cementa konstruiše i odgovarajuća linija aggregata. Dalje je zamereno da je linjni kriterij u gradevinskoj praksi suviše strog i da je bolje da se predvide izvesne zone traženog sastava. Obimni radovi Grafa kreću se u tome pravcu i njegove sugestije su uglavnom sadržane i u nemačkim propisima, koji predviđaju tri lomljene linije granulacije između kojih se nalaze područja »vrlo dobrog« i »uporeljivog« aggregata (sl. 4).

Naši tehnički propisi preporučuju da sastav aggregata leži u oblasti između Fullerove krive (bez cementa) i krive zvane EMPA (*Eidgenössisches Materialprüfungsamt*, Zavod za ispitivanje materijala pri Visokoj tehničkoj školi u Zuriku).

Ukoliko se želi postići što čvršći beton, njegov sastav treba da je što bliži krivoj EMPA (koja daje nešto krupniji agregat). Ali kada je u pitanju što savršenije ugradivanje betona, u cilju savladivanja teškoća pri gušćoj armaturi, pri izradi tanjih profilisanih elemenata ili iz drugih razloga, preporučuje se linija što bliža Fullerovo (koja ima više peska).

Obrazac za Fullerovu liniju glasi:

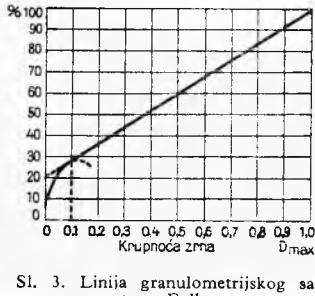
$$P' = 100 \sqrt{\frac{d}{D}},$$

a obrazac za liniju EMPA:

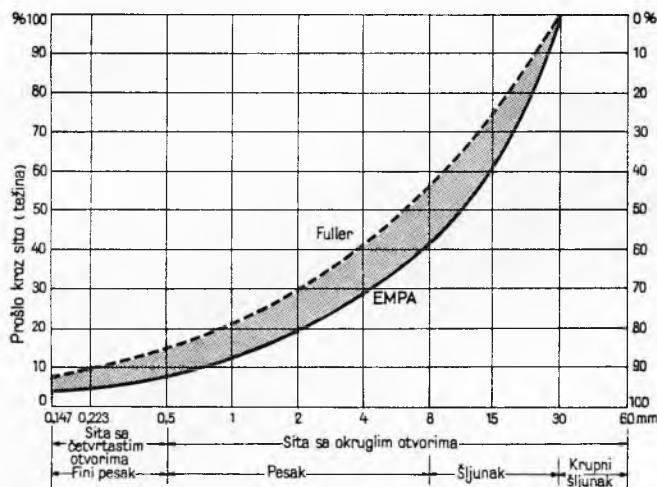
$$P = 50 \left( \frac{d}{D} + \sqrt{\frac{d}{D}} \right).$$

Pri tom su  $P$  i  $P'$  prosevci u težinskim procentima,  $d$  prečnik otvora sita,  $D$  prečnik maksimalnog zrna.

U duhu iznetog, svakoj izmeni maksimalnog zrna odgovara donekle i izmena dijagrama. Odgovarajući dijagram prema našim (a i nekim drugim) propisima crta se tako da se vrednosti na osi apscisa nanose u logaritamskoj razmeri; to zbog toga da bi sitne frakcije, koje u tehnologiji dobrog betona predstavljaju krupan problem, što jasnije došle do izražaja. U sl. 5 su ucrtane linije granulometrijskog sastava za maksimalno zrno  $\varnothing 30$  mm.

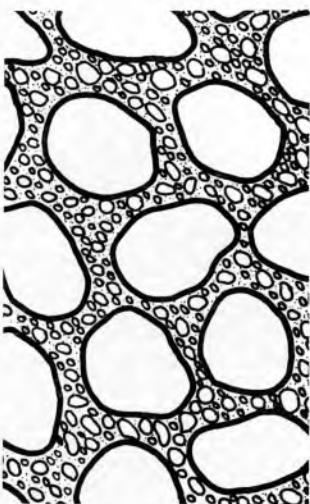


Sl. 3. Linija granulometrijskog sastava »Fuller«



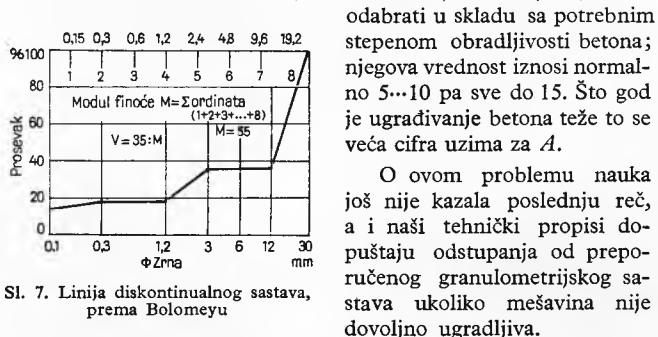
Sl. 5. Preporučeno područje granulometrijskog sastava prema Privremenim tehničkim propisima za beton i armirani beton

Sve linije o kojima smo do sada govorili su *kontinualne*; njihov tok ne poznae nagle prelaze, skokove itd. Postoji, međutim, i teorija o *diskontinualnim linijama*. Pri tom se polazi od osnovnog razmatranja da se povoljan sastav može postići i time što se šupljine između krupnijih zrna popune sitnim zrnima, a izostavljaju se izvesne srednje frakcije. Izgled ovakvog sastava pokazan je na sl. 6. Ovaj slučaj može u praksi imati opravdanje kada se npr. agregat stvara mašinskim drobljenjem, pri čemu se dobijaju krupna zrna i sitni otpaci. Sa pitanjem diskontinualne granulacije maltera mnogo se bavio Feret, koji je mnogobrojnim opitima dokazao da se maksimalna kompaktnost maltera sa peskom krupnoće zrna do 5 mm postiže mešanjem 38% finih zrna frakcija 0/0,5 i 62% krupnijih peščanih zrna frakcije 2/5. Bolomey je ovo pravilo uopšto za celokupni agregat, pa po njemu izlazi da je najbolja diskontinualna granulacija ona koja sadrži 38% zrna od nule do 0,1 D i 62% zrna od 0,4 D do 1,0 D (D je prečnik maksimalnog zrna).



Sl. 6. Beton diskontinualnog sastava agregata

povoljnju granulaciju uopšte, Bolomey preporučuje krivu prema obrascu:  $P = A + (100 - A) \sqrt{d : D}$ , u kojemu je uzet u obzir i cement. Oznake su kao ranije, s time da je A broj koji treba odabrat u skladu sa potrebnim stepenom obradljivosti betona; njegova vrednost iznosi normalno 5...10 pa sve do 15. Što god je ugradivanje betona teže to se veća cifra uzima za A.



Sl. 7. Linija diskontinualnog sastava, prema Bolomeyu

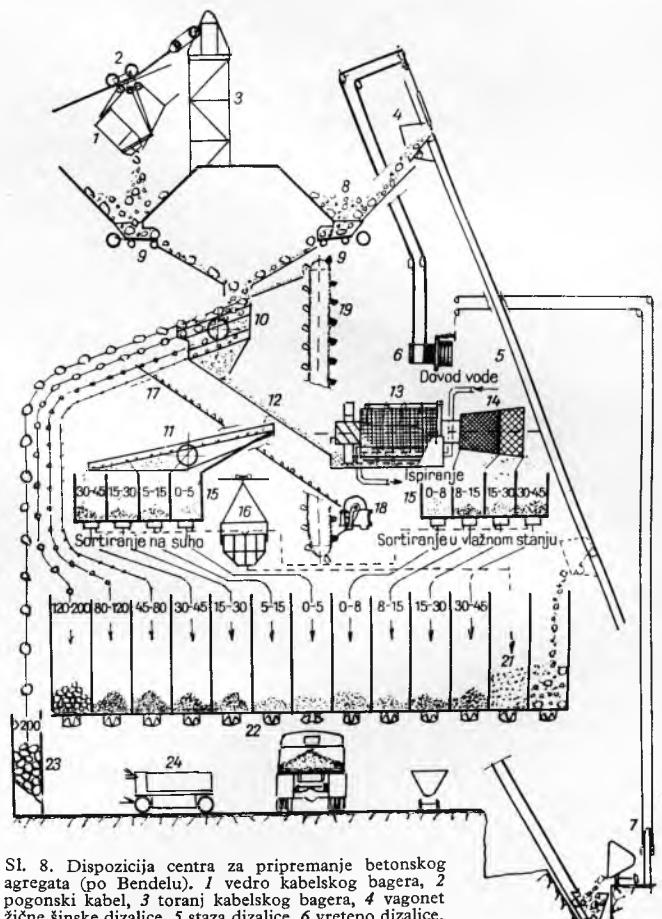
U pogledu veličine maksimalnog zrna agregata važi pravilo da za armirani beton prosečno guste armature ne treba prekoraciti veličinu zrna 25...30 mm, a u slučaju vrlo gусте armature ili vrlo tankih konstruktivnih elemenata treba smanjiti ovaj preč-

nik, da bi se sprečilo stvaranje »gnezd« u betonu. Nasuprot tome, u betonu koji se masovno ugrađuje (veliki fundamenti i zidovi ma kog karaktera) treba se što više koristiti krupnjim agregatom, čija gornja granica gdekada zavisi i od kapaciteta mešalice i od mogućnosti transporta svežeg betona. Korist od krupnog agregata veća je za elemente napregnute na pritisak nego za elemente koji su napregnuti na savijanje.

Potreba pripremanja agregata, što uključuje i njihovo pranje, odvajanje po frakcijama i sortiranje, na velikim gradilištima ili pri tvornicama betona zajedničkim za više gradilišta, zahteva izradu specijalnih centara za tu svrhu. Na sl. 8 prikazan je dispozicioni nacrt jednog centra za pripremanje agregata prema Bendelu (Luzern). Danas se s obzirom na uočeno ogromno značenje zamuljenosti agregata postavljaju specijalni zahtevi u vezi sa odvajanjem najfinijih, prašinastih frakcija. Prema Ederu bi trebalo postupkom ispiranja provesti odvajanje na frakcije zrna do 0,06 mm, 0,1 mm, 0,15 mm i 1,0 mm.

Ukoliko se kao agregat za izradu teškog betona upotrebljava topionička zgura, primenjuju se, po analogiji, ista granulometrijska načela kao i pri upotrebi kamenog agregata.

Pri svim odlukama treba imati u vidu da cilj izrade dobrog betona nije uvek stvaranje betona što veće čvrstoće, već i što



Sl. 8. Dispozicija centra za pripremanje betonskog agregata, po Bendelu. 1. vedro kabelskog bagera, 2. pogonski kabel, 3. torani kabelskog bagera, 4. vagonet žične šinske dizalice, 5. staza dizalice, 6. vreteno dizalice, 7. pogon dizalice, 8. levak za materijal dovezen preko dizalice, 9. regulator dodavanja, 10. vibraciono sito za grube frakcije, 11. vibraciono sito, 12. zatvarač, 13. mašina za pranje i podvodno sortiranje, 14. konus za sortiranje, 15. privremeni silos, 16. dozer, 17. pokretni zatvarač, 18. drobilica, 19. elevator, 20. silosi za razne granulacije, 21. silos za određene betonske smeše, 22. zatvarač silosa, 23. deponija kamena, 24. kola za odvoženje pripremljenog agregata

celishodnije obradljivosti (mogućnosti ugradivanja). Često se, naročito u hidrotehnici, zahteva što manja propustljivost za vodu, pa i apsolutna nepropustljivost; dalji zahtevi mogu se odnositi na punu otpornost prema mrazu ili na druge osobine betona u optimalnoj meri.

Laki betoni se ne izrađuju prema navedenim granulometrijskim principima, jer oni ne treba da budu što kompaktniji već, naprotiv, što porozniji.

## IZRADA BETONA

Izrada gradilišnog betona predstavlja rad u više etapa. Glavni su postupci pri izradi teškog (normalnog) betona: *pripremanje sastojaka, spravljanje betona, transport betona, ugradivanje betona i nega svežeg betona*. Sem toga se, u toku celokupne izrade, vrši kontrola osobina i kvaliteta betona.

O pripremanju sastojaka bilo je već govora u prethodnom poglavlju.

**Spravljanje betona.** Spravljanje betona mora se, kako na gradilištu tako i pri industrijskoj izradi, redovno provoditi mašinskim putem. Ručno mešanje dopušta se sasvim izuzetno, za sporedne potrebe i za male količine.

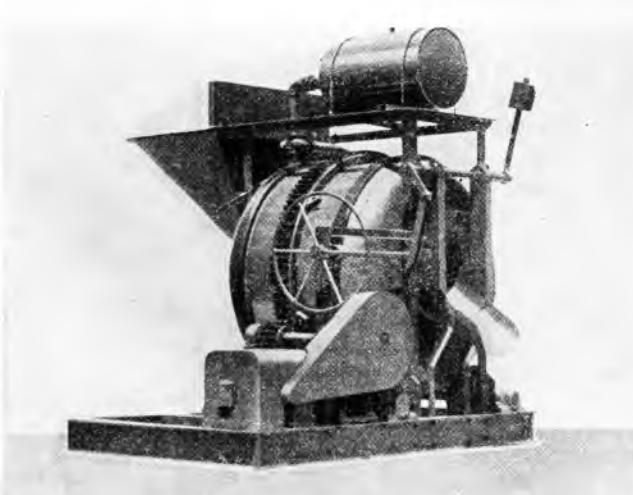
Gradilišne mašinske mešalice, po pravilu, obavljaju mešanje u bubnju koji se okreće oko vertikalne, horizontalne ili nagnute osovine. Standardni kapacitet bubnja kreće se kod starijih tipova mašina od 200 do 500 litara, dok novije mešalice imaju kapacitet

do 1500 litara, izuzetno i više. Cement i agregat dodaju se preko ugrađenih kofa automatski ili ručno, a na novijim tipovima primenjuju se uredaji (automatske zgrtalice, vretena i dr.) koji omogućuju brzo automatsko odmerivanje i dodavanje agregata i cementa u količinama zahtevanim za pojedina mešanja. Određena količina vode mora se u svakom slučaju dodavati automatski i precizno.

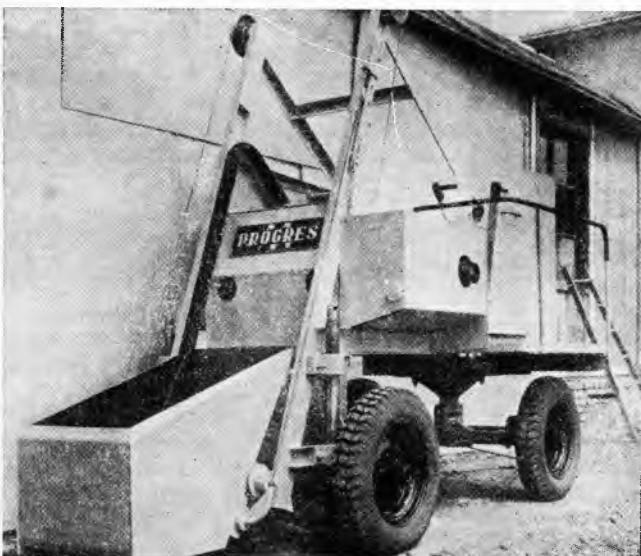
L'Hermite je ispitivao uticaj konstrukcije mešalice na njihovu efikasnost sa gledišta kvaliteta betona. Pri tom je utvrdio da su najceli-

shodnije mešalice sa vertikalnom osovinom, zatim one sa horizontalnom, koje se najviše upotrebljavaju na velikim gradilištima, a najgore da su mešalice sa osovinom nagnutom preko  $30^\circ$ . Na sl. 9 predstavljena je mala mešalica sa vertikalnom osovinom, kapaciteta 150 litara, na sl. 10 mešalica kapaciteta 1300 litara sa horizontalnom osovinom, a na sl. 11 mešalica kapaciteta 250 litara, sa dve horizontalne osovine.

Za proizvodnju masovnog betona poslednjih godina se izgradiju uredaji vrlo velikih mogućnosti. Sl. 12 prikazuje toranj



Sl. 9. Mešalica za beton sadržine 150 litara («Gradis» Maribor)



Sl. 11. Protustrujna mešalica od 250 litara («Progress», Mladenovac)

za spravljanje betona konstrukcije CIFA, Italija, čiji kapacitet proizvodnje dostiže  $100 \text{ m}^3$  svežeg betona po satu. Ima dve mešalice od 1000 litara i 7 silosa za agregat i cement. Odmeravanje

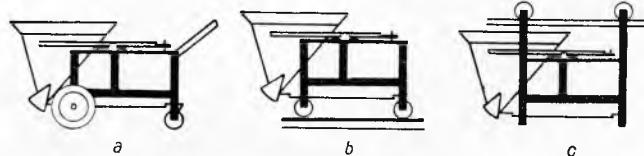


Sl. 12. Toranj za masovno spravljanje betona na gradilištu brane «Grančarevo»

i unutarnji transport sastojaka betona se automatski reguliraju. Agregat se transportuje transporterima a cement pneumatski. Ovakvi tornjevi izrađuju se do kapaciteta  $160 \text{ m}^3$ .

Pri spravljanju betona preporučuje se da se u bubanj mešalice, ili drugu adekvatnu napravu, stave najpre sastojci finijeg zrna, dakle cement, pa sitnije frakcije agregata (pesak), a zatim krupnije (šljunak). Jedan deo vode treba nasuti pre ostalih sastojaka, a ostatak posle cementa. Vreme mešanja zavisi od mnogih osobina materijala: granulometrijskog sastava, količine cementa i predvidene konzistencije. U prosečnim gradilišnim mešalicama uzima se da mešanje traje oko  $1\frac{1}{2}$  do 2 minuta. Načelno se može uzeti da je za savršeno mešanje potrebno 40 do 20 okretaja. Izmešani materijal mora da je potpuno homogenog izgleda, a svako zrno agregata (bez obzira na krupnoću) u potpunosti obavijeno cementnom košuljicom. Treba sprečiti da za vreme mešanja iz mešalice iscuri cementno mleko (cement izmešan sa vodom). Savremena tehnologija betona zahteva da se u svakom slučaju svi sastojci betona, dakle cement, pojedine frakcije agregata i voda, dodaju za svako mešanje prema strogo utvrđenom receptu. Ispravno je samo dodavanje sastojaka po težini. Naši propisi

tolerišu, međutim, i dodavanje agregata po zapremini. Zahvaljujući industriji pribora za spravljanje betona, gradilišta danas raspolažu za automatsko odmeravanje količina sastojaka uređajima (*dozerima*) koji su ili u sastavu mešalice ili odvojeni. Sl. 13 shematski prikazuje dozer za cement u vidu ručnih kolica (proizvod fabrike »Pfister«), koji se može upotrebljavati kako na običnim stazama tako i na tračnicama ili na žičanim kablovima.



Sl. 13. Dozer za cement (sistem »Pfister«); a na običnoj stazi, b na šinama, c obešen na užetu

Prilikom određivanja uzajamnih težinskih, odnosno zapreminskih odnosa pojedinih sastojaka betona polazi se od namene betona, preseka konstruktivnog elementa, gustine armature i eventualnih drugih podataka koji su u vezi sa kvalitetom i sa potrebom dobre ugradljivosti materijala. Normalno se pri tom polazi od količine cementa, a zatim se izračunava potrebna količina vode i pojedinih frakcija agregata.

*Količina cementa* određuje se na osnovu prethodnih proba, redovno za  $m^3$  ugradenog betona. Normalno se za armirani beton uzima 250...350 kg cementa/ $m^3$ , izuzetno i više. Za nearmirani beton se, prema prirodi konstrukcije, uzima 150...350 kg cementa/ $m^3$ , izuzetno (za betoniranje ispuna) i manje. U tehnologiji dobrog betona smatra se krupnom tehničkom i ekonomskom greškom kada se kvalitet betona želi poboljšati samo uvećavajući količine cementa. Količina cementa veća od  $\sim 300 \text{ kg}/m^3$  može uticati negativno, povećanjem skupljanja betona i izazivanjem naprslina.

*Količina agregata* određuje se na osnovu granulometrijskih kalkulacija prema obrascu

$$A = \gamma_b - C - V,$$

gde je  $A$  težina agregata u  $m^3$  betona,  $\gamma_b$  težina 1  $m^3$  ugradenog betona,  $C$  težina cementa u  $m^3$  betona,  $V$  težina vode u  $m^3$  betona.

Pri tom treba na osnovu opita odrediti meru zbijenosti betona prilikom ugradivanja i za ovaj procenat smanjiti količinu svih sastojaka potrebnih za izradu 1  $m^3$  betona utvrđene zapremske težine.

*Količina vode* određuje se na osnovu željene konzistencije svežeg betona i određenog *vodocementnog faktora*. Od određene težine vode oduzima se, prilikom njenog efektivnog dodavanja, količina koja odgovara prirodnoj vlažnosti ugradenog agregata.

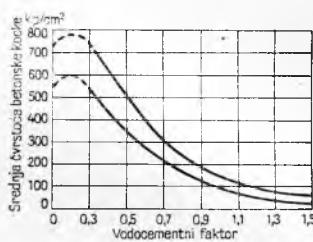
*Konzistencija betona* je njegova sposobnost oblikovanja. Ta osobina još nije u međunarodnoj razmjeri određena definisana; ona zavisi od količine cementa i sastava agregata, a naročito od količine vode. Agregat dobrog granulometrijskog sastava zahteva manje vode. Količina vode veća od one koja je potrebna za pravilno odvijanje hemijskog procesa vezivanja cementa, dakle nepotrebni višak vode, docnije ispari, pa ostaju mikroskopski sitne, pa i veće šupljinice. Beton je, normalno, sav prožet porama u kojima se u početku nalazi vazduh ili voda. Kvalitet betona, naročito njegova čvrstoća i propustljivost za vodu, u velikoj meri zavisi od procentualne količine šupljeg prostora u betonskoj masi, pre svega od poroznosti koja je posledica kako isparavanja vode tako i nedovoljnog zbijanja ili drugog nepravilnog postupka pri ugradivanju.

Abrams je prvi sistematski rešavao pitanje uloge vode u betonu i njenog uticaja na kvalitet tog materijala. Prema rezultatima istraživanja ovog američkog tehnologa postoji uzajamni odnos između granulometrijskog sastava agregata i potrebne količine vode. U vezi sa tim on je uveo pojam *modula finoće*; taj modul izračunao je u svakom konkretnom slučaju tako da je sabrao procente ostataka na svim sitima Tylerove garniture za presejavanje (sita otvora 0,147 do 38,1 mm, pri čemu su otvoru svakog narednog sita približno dvostruke površine), pa je taj zbir podelio sa 100. Na osnovu mnogobrojnih opita Abrams navodi da sve mešavine jednakog modula finoće daju betone jednake čvrstoće,

a da najbolji betoni imaju module između 4,6 i 6,2. Ovo pravilo osporavano je docnije, pošto se utvrdilo da se u svim ovakvim slučajevima ne dobija ista obradljivost betona i, obrnuto, kada se traži ista obradljivost betona, različiti agregati istog modula finoće traže različite količine vode. Abramsovo pravilo o modulu finoće dalje je razradio i unekoliko drukčije formulisao Hummel, a Bolomey je zavisnost modula finoće i količine vode izrazio jednostavnim obrascem

$$V = 35 : M.$$

Najveća Abramsova zasluga je formiranje pojma *vodocementnog faktora*, u kom je izražen težinski odnos vode i cementa. Prema njegovom shvatanju, na čvrstoću betona direktno utiče samo vodocementni faktor; to pravilo se odnosi samo na obradljive mešavine, uglavnom na plastični beton. Na sl. 14 predstavljen je, prema Hummelu, taj odnos za dva različita betona. Teorijski bi prema tome najbolji bio beton sa toliko vode koliko je svega potrebno za vezivanje predvidene količine cementa. Praktički se to ne može provesti jer je za pravilno ugradivanje betona potreban izvestan višak vode u cilju savlađivanja otpora koji sveži beton suprotstavlja ugradivanju. Ipak, kao fundamentalno pravilo važi da se pri izradi betona sme dodavati samo onoliko vode koliko je bezuslovno potrebno radi pravilnog ugradivanja; svaki litar vode preko te količine na štetu je kvaliteta izrade. Smanjivanju količine vode za spravljanje služe i ranije spomenuti plastičifikatori. Optimalna količina vode ne sme se za pojedine slučajeve propisivati, već se mora utvrditi eksperimentom na gradilištu, imajući u vidu izneti princip o potrebiapsolutne srednje vode prilikom spravljanja svežeg betona.

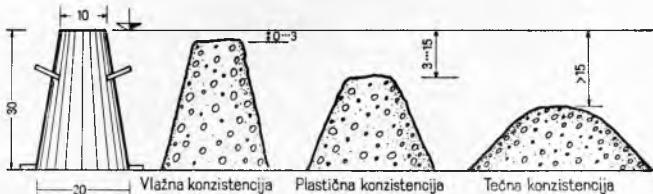


Sl. 14. Odnos čvrstoće betona i vodocementnog faktora, prema Hummelu

Praktički se, zavisno od oblike i preseka konstrukcije i gustine armature, spravlja svež beton u tri konzistencije. To su: *vlažna konzistencija* (stvarno, najsuvlja), koja dolazi u obzir pri izradi masovnih nearmiranih ili slabo armiranih konstrukcija; *plastična konzistencija*, namenjena poglavito armiranom betonu i *liveni* (tečna) *konzistencija*, koju bi trebalo primenjivati samo u retkim slučajevima vrlo gustog sklopa armature (za čvorove) ili za vrlo tanke, profilisane elemente. Čvrstoće vlažnog, plastičnog i livenog betona približno se odnose među sobom (u inače istim uslovima) kao  $1 : \frac{2}{3} : \frac{1}{2}$ .

Sasvim približno može se računati da vlažni beton ima vodocementni faktor do 0,55, plastični beton od 0,5 do 0,75, a liveni preko ove vrednosti.

U interesu ravnomernosti kvaliteta mora se na gradilištu redovno kontrolisati da li se primenjuje beton utvrđene konzistencije. Za ovo služi originalni Abramsov konus visine 30 cm (sl. 15), ili, u duhu naših propisa, *probni stočić*. Abramsov

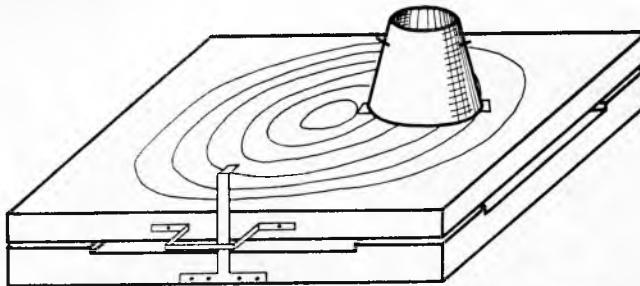


Sl. 15. Ispitivanje konzistencije svežeg betona sa Abramsovim konusom

limeni konus postepeno se puni svežim betonom u 4 sloja, a svaki sloj se 25 puta izbode štapićem  $\phi 15 \text{ mm}$ ; limeni konus se zatim izdiže, pri čemu se kupa svežeg betona slegne. Mera sleganja je indikacija za konzistenciju betona. Vlažni betoni imaju sleganje 0...3 cm, slabije plastični 3...7 cm, jače plastični 7...15 cm, a liveni betoni pokazuju veće sleganje.

*Probni stočić* (sl. 16) sastoji se od dve drvene ploče pokrivene limom, spojene na jednoj strani šarkama. Pomoću ruke može se gornja ploča izdici za 4 cm. Sveži beton se stavlja na stočić

preko koničnog limenog kalupa visine 20 cm. Posle toga izvodi se opit rasprostiranja izdizanjem gornje daske 15 puta do visine 4 cm. Mera rasprostiranja svežeg betona utvrđuje se, kao prosek, merenjem u dva međusobno upravna pravca. Plastični betoni imaju mjeru rasprostiranja otrpilike 36...50 cm, a liveni betoni preko ove cifre (do približno 65 cm). Metod nije podesan za suvlje betone, ali daje izvesne indikacije u pogledu betona sklonog razjednjavanju (segregaciji).



Sl. 16. Probni stočić za ispitivanje konzistencije svežeg betona

Pored navedenih postupaka za utvrđivanje konzistencije postoje i razni drugi metodi. U novije vreme preporučila je međunarodna organizacija RILEM i neke nove postupke, i to: opit na sleganje (*flow-test*), prema kome se limeni konusni kalup donjem prečniku 25 cm, gornjeg 17 cm, a visine 12,5 cm napuni svežim betonom u 2 sloja; beton se po uklanjanju kalupa izdiže i spušta 15 puta sa visine 1,25 cm. Kriterij za konzistenciju jeste procentualni odnos povećanja prečnika baze po izvršenom opitu. Za slabo ugradljive betone, krupnoće zrna do 40 mm, preporučuje se opit po metodu »faktora gustine« (*compacting factor*). Za slabo plastične betone, sa sitnim agregatom, preporučuje se ispitivanje konzistencije po metodu »brzine oblikovanja« prema Vebeu (*moulding test*).

**Transport betona.** Po završenom spravljanju beton se, u vidu manje ili više plastične mase, transportuje do mesta ugradivanja. Bitno je da za vreme transporta materijal zadrži svoju homogenost. Nestrucnim postupcima dolazi do razjednjavanja betonske mase, do segregacije. Njoj podležu naročito betoni sa krupnjim zrnima, koja imaju tendenciju da se izdvode od ostale mase; toj tendenciji odupire se viskozno trenje na površini zrna, koje je relativno slabije ukoliko je zrno krupnije. Zbog toga već pri sastavljanju betonske smeše treba imati u vidu ovu činjenicu, pa se ceo sastav i konzistencija moraju podesiti tako da odgovaraju zahtevima koji se postavljaju s obzirom na mogućnosti transporta. Sveža betonska masa mora biti sposobna da se opire dinamičkom dejstvu u toku transporta.

Po Tournonu može se stepen otpornosti prema segregaciji odrediti na sledeći način. Prizmatični sud se napuni svežim betonom pa se odredi visina  $h$  na kojoj se nalazi težiste. Zatim se sud transportira na način koji odgovara stvarnom transportu betona. Za ovo vreme se, usled dinamičnih uticaja, krupniji agregati pomeraju na dole, u pravcu dejstva sile teže. Prema tome se i težiste spušta za  $\Delta h$ ; ta razlika služi kao mera sklonosti ka segregaciji.

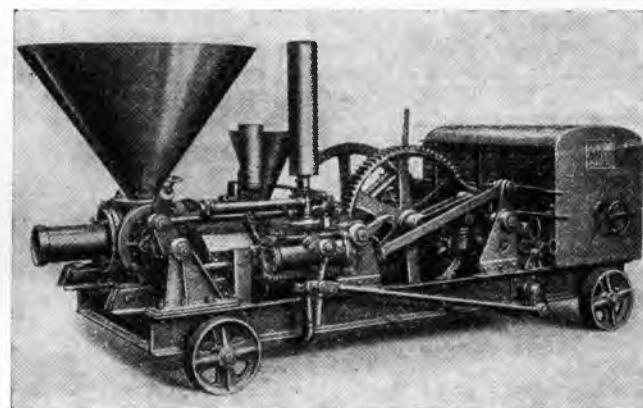
U nas je još uvek čest ručni transport kolicima zapremine 30...50 litara, odnosno kolicima na gumenim točkovima, zapremine 60...80 litara, ili pak metalnim kolicima, tzv. japanerima (poluvajlkasti sud na horizontalnoj osovini), zapremine 140...180 litara, koja guraju po 2 čoveka. Pri tom dužina transporta ne prelazi 20...100 m. Staze po kojima se vozi sveži beton mora da su što ravnije, a vozila mora da se kreću što mirnije. Za duže transporte dolaze u obzir vagoneti na tračnicama, ili pak, što se sada češće praktikuje, specijalna motorna vozila ili vozila koja vuku traktori. Potreba da se za gradilišta zbijena na malom prostoru beton priprema na udaljenim centralnim mestima, u tzv. betonskim fabrikama, dovele je do pojma *transportnog betona*. Taj se beton transportuje specijalnim vozilima u kojima se povremeno, prema potrebi, vrši dalje mešanje spravljenog betona. Radi se od cementa čiji je početak vezivanja što više usporen, granulometrijski sastav agregata što pravilniji, a vodocementni faktor u blagoj meri povišen. Dužina transportske poteline ne bi trebalo da prelazi  $\frac{1}{2}$  do 1 sat, zavisno od temperature vazduha, — u svakom slučaju treba ozbiljno

voditi računa o stvarnom početku vezivanja s jedne strane (taj početak ne mora biti identičan sa standardnim početkom vezivanja u laboratoriju), i o vremenu potrebnom za transport, za ugradivanje i za ostale radne operacije, s druge strane.

*Vertikalni transport* obavlja se u svojoj najprimitivnijoj formi lopatama, sa sprata na sprat. Inače se obavlja pomoću dizalica na koja se stavljuju kolica, japaneri i sl. Savršenije su dizalice u vidu zgrtalica (grajfera), bagera (paternostera) i dr. Ako se beton spušta sa veće visine, treba predvideti etaže spuštanja, ne više od 3...4 m, a na tim odstojanjima staviti platforme ili pomoćne silose. Beton ni u kom slučaju ne sme da slobodno pada više od 1 m. Pri kosom spuštanju treba nastojati da se ovo ne sprovodi preko kosina (strmih ravnih) već kroz cevi, jer se, kad je u pitanju plastičniji beton, cement lepi za kosine i beton »posni».

Savremeniji je način horizontalnog i vertikalnog transporta betona pomoću prevoznog sredstva na bazi pokretnih transportnih traka. Ovo se naročito primenjuje pri izradi manjih zgrada. Poznati tipovi tih traka imaju dužinu 8...20 m, širinu platna 50 cm, a omogućavaju duže horizontalne transporte u raznim pravcima, kao i vertikalne transporte do visine oko 8 m, zavisno od tipa.

Na specijalni savremeni način gradilišni transport betona vrši se pomoću crpki (pumpi). Taj postupak zahteva tzv. *pumpani beton*. Spravljeni beton se pomoću pumpi podiže kroz čelične cevi do visine oko 35 m, pa se zatim cevima prenosi do odstojanja koje, za sada, iznosi maksimalno  $\sim 300$  m. Za to se može primeniti beton plastične konzistencije, maksimalnog zrna oko 70 mm. Pri tom načinu transportovanja nije moguća segregacija. Na sl. 17 prikazana je betonska pumpa sistema »Kaiser», maksimalnog kapaciteta transporta.



Sl. 17. Betonska pumpa (sistem »Kaiser«)

**Ugradivanje betona.** Načelno, betonsku masu treba po završenom spravljanju ugraditi što pre.

Pod ugradivanjem podrazumevamo 2 postupka: popunjavanje određenog prostora svežim betonom i zbijanje sveže betonske mase do potpune kompaktnosti.

Zbijanju treba da prethodi *unošenje betona* u oplatu, iskopanu temeljnju jamu ili drugi neki ogradieni prostor. Ovo se provodi bilo direktnim, postepenim izručivanjem materijala iz vozila kojim je beton dopremljen, odnosno neposredno iz cevi ili sa kosina, ili se pak materijal unosi lopatama. Visina padanja iz vozila, i inače, ne treba da je veća od 1 m. Ubačeni beton treba motkama ili lopatama ravnomerno raspoređiti po celom prostoru pazeći naročito da se docnjim zbijanjem omogući prodiranje betona do svih ivica predviđenog profila, a naročito između šipaka armature; svaka pojedina šipka, kao i celu armaturu, mora da je u celosti obavijena betonom.

Neposredno ugradivanje, dakle *zbijanje betona*, vrši se na različite načine, zavisno od konzistencije i raspoloživih sredstava. Zbijanjem se postiže delimično ili čak potpuno iščezavanje supljina, udaljavanje vazduha i vode iz betona.

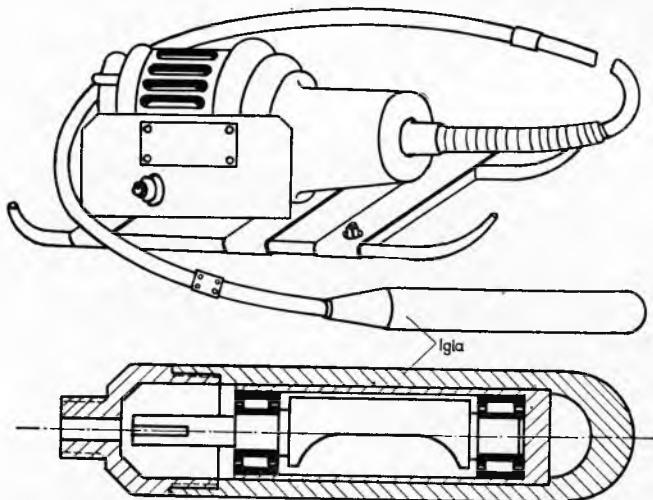
Vlažni beton može se nabijati ručnim železnim nabijačima težine 10...16 kg, širine stranica 10...30 cm. Za ovo se upotrebljavaju i automatski nabijači. Ručno nabijanje vrši se u slojevima 10...25 cm dotele dok voda ne izbije na površinu (beton se »znoji»).

Plastični i liveni betoni mogu se ručno ugraditi tzv. muljanjem letvama sa zatesanim vrhom, šipkama ili lopatama. Na taj način se u stvari provodi pravilno raspoređivanje materijala i popunjavanje međuprostora. Sličan efekat postiže se i protresanjem armature (što se samo izuzetno može da radi), udaranjem čekićem spolja po oplatama (npr. stubova) itd.

Kvalitetni beton dobija se samo *mehanizovanim postupcima*, između kojih je *vibriranje* najvažniji i najšire primenjeni.

*Vibriranjem* se smanjuje viskoznost cementnog lepa, smanjuje se trenje u agregatu, zrna se uzajamno pomeraju i približuju, a šuplji međuprostori se popunjavaju; pri tom iz sveže betonske mase iščezava vazduh, pa i izvestan višak vode. Vibriranjem se postiže puna kompaktnost betona, pravilno obuhvatanje čelične armature i pravilno formiranje komplikovanih profila. Pri masovnom betoniranju vibriranjem se može sprečiti stvaranje glatkih razdelnica između slojeva, jer se susedni slojevi u neku ruku »zavare« jedan za drugi.

U praksi se primenjuju uglavnom četiri metoda obrade betona vibriranjem, odnosno četiri vrste odgovarajućih uređaja. *Vibracioni stolovi* upotrebljavaju se u gradevinskoj industriji za izradu prefabrikovanih i drugih industrijskih elemenata. Pri tom se udarići i oscilacije stone ploče prenose na postavljene kalupe sa svežim betonom. *Površinski vibratori* u vidu lopata, ploča ili talpi stavljuju se neposredno na površinu betonskog sloja. Oni su posebni za vibriranje ploča, naročito kolovoza i sličnih, relativno tankih konstrukcija većih površina. Imaju relativno malu frekvenciju, od  $\sim 500$  oscilacija u minuti. *Oplatni vibratori* su mahom lagak tipa sa  $3000\text{--}9000$  oscilacija u minuti. Pričvršćuju se neposredno za oplate, pa protresanjem oplate dejstvuju i na susedni beton; radijus dejstva im je  $30\text{--}50$  cm. Upotrebljavaju se za tanje armirane elemente (stubove) sa gustom armaturom. *Pervibratori* vrše unutrašnje protresanje konstrukcije i njima se koriste redovno na našim gradilištima. Uredaj se sastoji od pervibratorske igle dužine  $40\text{--}70$  cm, prečnika  $25\text{--}100$  mm, izuzetno i većeg, i savitljive osovine, a na ovo se nadovezuje uređaj za dovod energije (električne struje, komprimiranog vazduha). Pervibratorska igla je mala vazdušna turbina s ekscentrom koji izaziva oscilacije; najčešći su pervibratori sa  $6000\text{--}9000$  oscilacija u minuti (sl. 18). Postoje i drugi, veći tipovi (tip bagoneta, budzovana i dr.), kao i tipovi veće frekvencije (sve do  $16\,000$  oscilacija/min). Prečnik igle odabire se s obzirom na veličinu konstrukcije i odstojanje između šipaka armature. Igra se utiskuje u beton i vadi po završenom vibriranju.



Sl. 18. Pervibrator sa presekom igle\*

Pervibriranje je završeno kada se oko igle na površini skupljaju mehurovi; obično pri tom izbija i tanak sloj cementnog mleka. Pri laganom izdizanju mora se sam od sebe popuniti prostor u koji je bila utisнутa igla; ako se to ne dogodi, beton je suviše suve konzistencije, nepodesan za pervibriranje. Pri pervibriranju treba održavati odstojanje od nekoliko centimetara od oplate, ne sme se zahvatiti armatura, stvrđnuti beton niti ma koji tvrdi predmet. Zavisno od veličine pervibratora, njegov se učinak

kreće od  $2$  do  $20\text{ m}^3$  betona na sat. Visina sloja koji se pervibrira iznosi između  $30$  i  $100$  cm. Postupak vibriranja na jednom mestu traje  $\sim 12\text{--}25$  sekundi.

Beton koji se ugrađuje vibriranjem treba da odgovara određenim uslovima. Pervibriranje livenih, jače plastičnih i previše suvih betona nije moguće. Najpodesnije su slabo plastične mase vrlo dobrog granulometrijskog sastava. Zahtevaju se dobro zaptivene oplate, a pri oplatnom vibriranju i ojačane.

Sam vibriranje primenjuju se i neki drugi mehanizovani načini ugradivanja betona. Između ovih najpoznatiji je postupak izrade tzv. *vakuum-betona*. Površine konstrukcije oblože se specijalnim zaptivnim oplatama sa filterom na unutarnjoj strani i ispod njih se veštački stvara niski pritisak; time se isisava voda iz svežeg betona, što u kratkom roku, približno za  $20$  minuta, dovodi do savršenog uzajamnog približavanja čestica. Vakuum-beton se odlikuje uvećanom čvrstoćom i manjom sklonosti ka skupljanju. Metod se primenjuje najviše pri izradi stubova skeletnih konstrukcija zgrada i za kolovozne ploče.

Drugi način mehanizovanog ugradivanja predstavlja tzv. *torkretiranje*. Pri tom se dejstvom komprimiranog vazduha cementni malter ili sitnija zrna sa mnogo peska izbacuju u tankim slojevima iz naprava sličnih kratkim topovskim cevima. Metod se mnogo primenjuje za izradu zidnih armiranih ili nearmiranih obloga, u tunelima, basenima, cevima velikog prečnika i drugde.

Specijalni vid ugradivanja betona predstavlja tzv. *blokirani* ili »Prepakt«-beton; stvara se time što se najpre agregat savršeno zbijja vibriranjem, a zatim se šupljine popunjavaju zalivanjem specijalno pripremljenim malterom, po potrebi i pod pritiskom (pumpanjem i penetracijom odozgo). Takav beton zahteva agregat krupniji od  $\sim 7$  mm; od običnog betona razlikuje se znatno manjim skupljanjem i manjim sadržajem cementa.

*Radni prekidi* su mesta na kojima je u toku izrade prekinut rad sa bilo kojih razloga. Razdelnice koje nastaju prilikom prekida važe kao oslabljena mesta, naročito sa gledišta čvrstoće na zatezanje i smicanje i sa gledišta propustljivosti za vodu. Ovde se usled zadržavanja cementnog mleka mogu stvoriti glatke, staklaste površine; može doći i do izbijanja krečnih hidrata koji se na vazduhu talože u vidu belih mrlja. Sve ovo, kao i prašina i druga nečistoća na površini, sprečava intimno spajanje slojeva betoniranih pre i posle prekida.

Prekide rada treba izbegavati na osetljivim mestima; ukoliko su neophodni, moraju se izvesti po utvrđenom programu. Po pravilu prekide treba vršiti upravno na pravac glavnih napona u konstrukciji: u stubovima horizontalno, u lukovima upravno na osu luka, u gredama upravno na osu u srednjoj trećini raspona (zbog uticaja srušujućih sila). Ukoliko je potrebno, prekidi se moraju izvesti ubacivanjem privremene oplate.

Na mestu prekida treba pri nastavljanju betoniranja, u interesu stvaranja savršenije veze, najpre ohrapaviti ranije betonirano površinu i četkama je oprati, a zatim nabaciti mešavinu betona bogatog sitnijim peskom i sa nešto više cementa nego inače. Zabranjuje se prelivanje ovakvih mesta cementnim mlekom, što ima suprotni efekat od željenog. Postoje i izvesni specijalni načini obrade starog betona na mestu prekida (postupak »Contex«, postupak sa fosfornom kiselinom), sa ciljem da se stari površinski sloj razori ili ostavi duže vremena svežim.

*Betoniranje pod vodom* vrši se kad se sa bilo kog razloga ne provodi obezbeđenje gradilišne jame. Za to se upotrebljavaju mešavine bogatije cementom i peskom. Unošenje treba vršiti samo u mirnoj vodi. Ukoliko postoje strujanja, a i u drugim težim slučajevima, mora se gradilišna jama obezbediti pribojem, zagatom ili na drugi način.

Kad je dubina vode malena (do približno  $\frac{1}{2}$  m), radi se sa betonom suvije konzistencije. Beton se nanosi na jedno mesto, u gomili, sa stranama pod prirodnim nagibom (oko  $30^\circ$ ), s time da površina nanetog materijala viri nad vodom. Dalje se beton nanosi samo iznad vode, pa se zatim lopatom oprezno pokreće u vodu. Pri većim dubinama radi se sa plastičnim betonom, koji se unosi u vodu specijalnim metalnim sanducima za betoniranje. Razni tipovi ovakvih sanduka podešeni su tako da se njihovo dno, kroz koje se beton ispušta, može mehanički (npr. potezanjem konopca) otvarati u ma kojoj dubini. Drugi način betoniranja pod vodom je pomoću levaka prečnika najmanje  $25$  cm, a čiji je

donji kraj utisnut u beton; sa napredovanjem radova on se postepeno izdiže i premešta. Manipulacija sa levcima jednostavnija je nego sa sanducima za betoniranje; tim načinom može se provesti betoniranje i u više slojeva, sve do dubine ~ 10 metara.

**Nega svežeg betona.** Prvi dani u životu svakog betona predstavljaju njegovu kritičnu fazu, u kojoj mu treba još od prvog časa posvetiti svu pažnju. Treba ga zaštiti kako od prevremenog gubitka vode namenjene pravilnom vezivanju, dakle od jakog sunca, veće topote i promaje, tako i od drugih nepovoljnih atmosferskih uticaja, mraza i jake kiše, koji bi mogli otežati, pa i sprečiti pravilno formiranje ovog veštačkog kamena. Treba ga, dalje, zaštiti i od mehaničkih povreda.

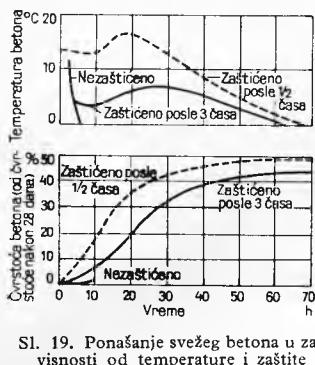
Sa zaštićavanjem i negom betona treba otpočeti odmah po njegovu ugradivanju. Ukoliko bi se u tome nešto zadocnilo, to može da ima dalekosežne posledice. Primer za to vidi se na sl. 19, koja pokazuje porast čvrstoće betona pri betoniranju na mrazu u slučajevima kad se sa zaštićavanjem otpočelo posle 1/2 časa, posle 3 časa i kad beton uopšte nije bio zaštićen; slika pokazuje i kretanje temperature u betonu u toku prvih 70 časova.

Za betonske radove najpoznejša je temperatura između  $+10^{\circ}$  i  $+22^{\circ}$  C. Pri znatno većim temperaturama treba provesti izvesne mere u cilju sprečavanja naglog vezivanja i stvrdnjavanja betona (snažno polivanje oplate, često polivanje svežeg betona, zaštitne obloge, zaštitni krovovi, hlađenje vode do temperature  $+1^{\circ}$  C, hlađenje agregata do  $+5^{\circ}$  C, itd.). Načelno, sveži beton, sem na mrazu, treba redovno polivati i pri tom ne štediti vodu (za razliku od spravljanja, kada se takva štednja zahteva). Na temperaturama između  $+5$  i  $+10^{\circ}$  C vezivanje i očvršćavanje betona provodi se nešto sporije. Međutim, na temperaturama između  $0^{\circ}$  i  $+5^{\circ}$  C ceo proces hidratacije cementa je znatno usporen, pa o tom treba voditi računa prilikom skidanja skela i oplate. Prema našim propisima treba rokove za skidanje oplate produžiti za onoliko dana koliko je dana temperatura bila ispod  $+5^{\circ}$  C.

Pri slabijem mrazu, do  $-3^{\circ}$  C, treba preduzeti neke mere koje omogućuju da se proces vezivanja razvije pravilno: zagrevanje vode do oko  $+40^{\circ}$  C i agregata do oko  $+15^{\circ}$  C, s time da temperatura betona ne prede  $25^{\circ}$  C, zatim pokrivanje svežeg betona pokrivačima (hasurama od slame, ceradama, krovnom hartijom, daskama, strugotinom, cementnim vrećama itd.). Pri jačem mrazu treba navedene mere pootkriti, a sem toga se preporučuje zagrevanje oplate toplim vazduhom, zagrevanje prostora ispod konstrukcija, dvostruka oplata sa međuprostorom popunjениm nekim jевtinim izolacionim materijalom (stajskim dubretom i dr.), smanjivanje vodocementnog faktora, povećanje količine cementa za  $\sim 50$  kg/m<sup>3</sup>, primena cemenata koji prilikom vezivanja razvijaju veću toplotu (aluminatnih ili visokovrednih portlandcemenata), a izbegavanje cemenata sa malim razvijanjem topline (metalurških). Ponekad se oko celog građevinskog prostora izrađuju privremene barake koje se iznutra zagrevaju parom ili vrućim vazduhom.

Na tržištu se mogu naći mnoga sredstva koja, obično na hemijskoj osnovi, treba da zaštite sveži beton od mraza. Njihova je vrednost ponekad sumnjičiva. Relativno dobri rezultati postignuti su pri blažim mrazevima dodavanjem CaCl<sub>2</sub> u optimalnoj količini 2 kg na 100 kg cementa; to sredstvo, međutim, može da napada armaturu i da izazove rascvetavanje na kamenoj oblozi. Prema Mironovu, u SSSR se izrađuju tzv. *hladni betoni* od portlandcementa više marke i lomljenog agregata od otpornih stena, sa dodatkom smeše CaCl<sub>2</sub> + NaCl u količini do 9 + 6 %. Ovakvi betoni podesni su za radove na temperaturi do  $-10^{\circ}$  C. Na temperaturama do  $-5^{\circ}$  C dodaje se samo NaCl u količini od 5%.

Puno obezbeđenje od mraza može se postići izradom *betona sa upijenim vazduhom*. O tom će biti govora u poglavljiju o osobinama betona (otpornosti na mrazu).



Sl. 19. Ponašanje svežeg betona u zavisnosti od temperature i zaštite

**Oplata i skela.** Ovi rekviziti, neophodni pri izradi građevinskih konstrukcija od monolitnog i armiranog betona, a i za mnoge konstrukcije od drugog materijala, obrađeni su kao zasebne jedinice ove enciklopedije pod odgovarajućim naslovima.

#### OSOBINE ČVRSTOG BETONA I NJIHOVO ISPITIVANJE

U toku procesa hidratacije cementa, sveži beton od plastične mase postaje čvrsta — veštački kamen. Očvršćavanje je prvi dana najveće, zatim sve sporije, a produžava se mesecima, pa i godinama. Kao standardni dan merodavan za upoređivanje čvrstoće i drugih osobina uzima se 28. dan, računajući od dana spravljanja betona. Za praktične potrebe pretpostavlja se da beton od portlandcementa i srodnih cemenata posle 7 dana postiže 70% standardne čvrstoće, a posle 3 dana približno 45%.

Očvrsti beton ima osobine koje su prilično u skladu sa osobinama prirodnog kamena. Međutim, preim秉tvo je betona njegova monolitnost, činjenica da konstruktivni delovi čine homogenu celinu i da im se može dati ma koji željeni oblik; to u znatnoj meri ubrzava postupke pri radu. Dalje preim秉tvo betona je mogućnost kombinovanja sa drugim materijalima, naročito čelikom i azbestom, da bi mu se dale osobine koje prirodnim kamen ne poseduje ili ih poseduje u vrlo maloj meri, kao što su: čvrstoća na zatezanje i savijanje, slaba toplotna provodljivost, postojanost pri požaru i dr.; podesnim odabiranjem sastojaka mogu se željene osobine podešavati u izvesnim granicama. S druge strane, beton je inferioran dobrom kamenu sa gledišta čvrstoće na pritisak, pa i sa gledišta izvesnih hemijskih agresivnih uticaja. U estetskom i dekorativnom pogledu beton zaostaje za prirodnim kamenom, ma da se izgled njegove površine može podešavati prema potrebi.

**Zapreminska težina.** Zapreminska težina normalnog betona treba prema propisima uzimati u račun sa 2400 kg/m<sup>3</sup>, a armiranog betona 2500 kg/m<sup>3</sup>. U stvarnosti se ova težina kreće u vrlo širokim granicama. Betoni sa kamenim agregatima imaju u našim krajevima zapreminsку težinu između 2200 i 2500 kg/m<sup>3</sup>, izuzetno nešto manju ili veću. Beton sa agregatom od topioničke zgure ima, prema prirodi ovog materijala, zapreminska težina i zatno manju od 2200 kg/m<sup>3</sup>, a i veću od 2500 kg/m<sup>3</sup>. Betoni sa specijalnim dodacima (metalnim prahom i dr.) mogu da imaju zapreminska težinu do  $\sim 3000$  kg/m<sup>3</sup>. Nasuprot tome, laki betoni, dakle betoni zapreminske težine ispod 1800 kg/m<sup>3</sup>, zavisno od agregata i načina izrade, mogu i sa agregatima od kamenih zrna imati zapreminska težinu manju od 1000 kg/m<sup>3</sup>, tj. takvu da ne tonu u vodi. Specifično laki agregati smanjuju ovu težinu do 200 kg/m<sup>3</sup>.

Zapreminska težina je u izvesnim granicama indikacija za otpornost betona. Sa porastom poroznosti opada zapreminska težina, a i čvrstoća betona. Zapreminska težina se dobija iz odnosa težine i zapremine, najbolje na standardnim kockama 20 × 20 × 20 cm.

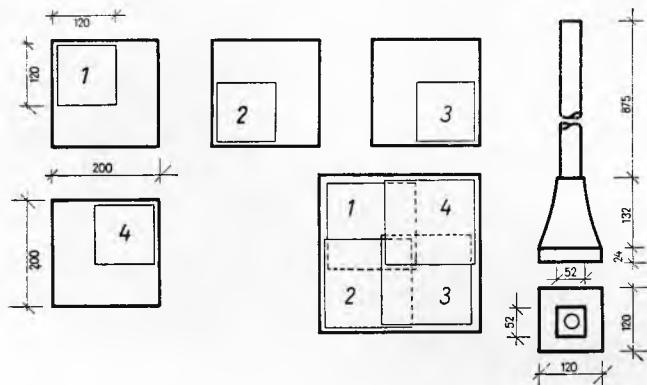
**Čvrstoća.** Za mehaničku otpornost betona, kao i prirodnog kamena, karakteristična je njegova čvrstoća na pritisak. Čvrstoća betona na zatezanje iznosi približno 2...12 % njegove čvrstoće na pritisak; prosečno se uzima 10 %. Čvrstoća na zatezanje pri savijanju veća je od obične čvrstoće na zatezanje za 50...100%. Čvrstoća na smicanje iznosi prosečno  $\sim 15\ldots25\%$  čvrstoće na pritisak. Beton se jedino armiranjem može osposobiti da bude otporniji prema savijanju i smicanju.

Čvrstoća na pritisak kreće se u našim prilikama za slabije betone od 100 do 150 kp/cm<sup>2</sup>, za kvalitetno osrednje u proseku od 200 do 250 kp/cm<sup>2</sup>; dobri betoni treba da imaju čvrstoću najmanje 300 kp/cm<sup>2</sup>, a vrlo dobri i odlični betoni imaju prosečne čvrstoće 400...600 kp/cm<sup>2</sup>, pa i više. Najveće čvrstoće betona koje su uopšte dostignute kreću se oko 1200 kp/cm<sup>2</sup>. Laki betoni, betoni za ispune i za druge konstrukcije koje ne nose imaju manje čvrstoće, pa i ispod 50 kp/cm<sup>2</sup>, sve do  $\sim 15\ldots20$  kp/cm<sup>2</sup>. Standardna čvrstoća betona je prosečna čvrstoća serije od 3 betonske kocke 20 × 20 × 20 cm, 28 dana posle spravljanja. *Marka betona* je garantovana standardna čvrstoća u duhu propisa. Čvrstoća betona na pritisak može se odrediti i na prizmama 12 × 12 × 36 cm ili 20 × 20 × 60 cm; u tom slučaju se kao standardna čvrstoća uzima  $\frac{1}{3}$  čvrstoće prizme. Čvrstoće dobijene na ugledima drugih oblika (cilindrima, pločama), pa i na kockama drugih dimenzija, mogu se uporedavati sa standardnim čvrstoćama jedino ako se poznaju odgovarajući faktori korelacije.

Čvrstoća betona raste i posle 28 dana u maloj meri. Beton star 6 meseci ima  $\sim 105\text{--}140\%$  standardne čvrstoće, a posle godinu dana  $110\text{--}165\%$ .

Za *ispitivanje čvrstoće* betona potrebno je da se pripremi dovoljan broj serija ugleda, bilo od mase namenjene betoniranju određenog elementa konstrukcije (kontrolne probe), bilo od specijalno pripremljenog betona za potrebe prethodnih studija i izradu recepta za spravljanje. Ugledi moraju biti oboleženi datumom i registratorskom oznakom; o njihovu uzimanju i drugim podacima moraju se voditi gradilišne knjige.

Betonski probni ugledi moraju se izrađivati u železnim kalupima podešenim za rasklapanje. Beton se unosi u kalup u 2 sloja, preko limenog nastavka. Obrada ugleda vlažnog betona vrši se ručno, železnim nabijačem težine 12 kg koji pada sa visine 15



Sl. 20. Način nabijanja probnih betonskih kocki, sa nabijačem

cm, prema sl. 20; svako od 4 mesta, u svakom sloju, dobija 3 udarca, i to se ponavlja još jedared. Cela kocka, dakle, prima 48 udaraca. Plastični i liveni beton se štapom ili lakinom nabijanjem ugrađuje na način analogan postupku pri betoniranju same gradevinske konstrukcije. Pri izradovanju ugleda pervibriranog betona klip pervibratora u osi kalupa spusti se do nekoliko centimetara iznad dna, a zatim se polagano izdiže dok se šuplji prostor nastao perevibriranjem ne zatvori. Spremljeni ugledi moraju se brižno čuvati u zatvorenim prostorijama, zaštićenim od mraza, promjene, sunca i visoke temperature. Mnogi savremeni propisi predviđaju da se ugledi, posle vadenja iz kalupa, čuvaju u vodi sobne temperature (+15 do +20°C) sve do određenog dana ispitivanja. Ispitivanje do sloma vrši se u hidrauličkim presama, tako da sila pritiska dejstvuje upravno na pravac nabijanja betona. Pre toga se strane ugleda moraju cementnim malterom ili drugim podesnim materijalom doterati tako da su savršeno paralelne.

U međunarodnoj razmerni postoji težnja da se betonski ugledi standardizuju u vidu cilindra  $\varnothing 15$  ili 30 cm, visine 30 ili 60 cm; u nekim zemljama je to već provedeno na ovaj ili sličan način. Ti ugledi zahtevaju znatno manju silu prilikom sloma nego odgovarajuće kocke. U našoj praksi se za proveravanje kvaliteta očvrstog betona mašinskim putem seku iz konstrukcije probni cilindrični ugledi; nestručnim nasilnim vadenjem oštećuje se beton pa rezultati nisu merodavni. Može se uzeti da je čvrstoća cilindra  $\varnothing 15$  cm i visine 15 cm približno jednaka čvrstoći kocke  $20 \times 20 \times 20$  cm. Čvrstoća cilindra  $\varnothing 15$  cm a visine 30 cm iznosi približno 87% čvrstoće kocke.

Potreba da se za ispitivanje čvrstoće betona upotrebljavaju mašine jakog kapaciteta dovela je do izvesnih uproštenih postupaka ispitivanja. Bolomey zasniva svoj metod na zaključcima Fereta da otpornost betona zavisi od cementnog maltera u betonu, a da ne zavisi bitno od krupnijih agregata kojima je dodeljena uloga materijala za ispunu. Na osnovu toga, on smatra da je dovoljno vršiti ispitivanje na ugledima dobijenim izlučivanjem maltera iz svežeg betona.

Uputstva uz naše propise za beton dopuštaju indirektno ispitivanje betona prema Empergeru, preko probnih greda koje se do sloma opterećuju na savijanje.

Feret je prvi postavio empirijski obrazac sa ciljem da se na osnovu poznatih osobina osnovnih sastojaka unapred odredi čvrstoća standardne betonske kocke ( $\beta_p$ ). Obrazac glasi:

$$\beta_p = K \left( \frac{c}{1-a} \right)^2.$$

U njemu je  $K$  konstanta koja karakteriše marku cementa, konzistenciju betona i druge osobine (za betone od 28 dana kreće se od 1800 do 2600 kp/cm<sup>2</sup>);  $c$  apsolutni volumen cementa u zapreminskoj jedinici betona, tj. težina cementa u zapreminske jedinici betona podeljena njegovom specifičnom težinom;  $a$  apsolutni volumen agregata u zapreminske jedinici. Roš je dalje razvio Feretov obrazac time što ga je primenio za proračunavanje očekivane čvrstoće koga dana  $d$ . Njegov obrazac glasi:

$$a\beta_p = K \left( \frac{c}{1-a} \right)^2 \cdot \frac{k_1 \cdot d^{2/3}}{k_2 + d^{2/3}}.$$

U njemu je  $a\beta_p$  čvrstoća betonske kocke posle  $d$  dana,  $K \left( \frac{c}{1-a} \right)^2$

Feretova čvrstoća posle 28 dana,  $k_1$  i  $k_2$  konstante koje za beton plastične konzistencije iznose 1,50 odnosno 4,61, a za beton vlažne konzistencije 1,40 odnosno 3,69. U nas se danas za proračunavanje standardne čvrstoće betona ( $\beta_{28}$ ) iz čvrstoće utvrđene ma kojeg dana  $n$  ( $\beta_n$ ) primenjuje obrazac što ga daje Bechyně:

$$\beta_{28} = \frac{1}{0,28 + 0,5 \log n} \cdot \beta_n.$$

Savremena težnja u oblasti ispitivanja materijala usmerena je razvijanju ispitivačkih metoda *bez razaranja*, dakle utvrđivanju otpornosti betona na samoj konstrukciji. Grubi ispitivački postupak sastoji se u udaranju objekta čekićem, pri čemu se visina proizvedenog zvuka uzima kao približna indikacija kvaliteta; kompaktni, dobro zbijeni materijal daje, po pravilu, viši ton nego što ga daje slab, a naročito napršli materijal.

Neke se metode ispitivanja osnivaju na tome da postoji korelacija između čvrstoće i tvrdoće materijala. Gaede je konstruisao specijalni ispitivački čekić sa oprugom, koji udarom utiskuje u beton čeličnu kuglicu  $\varnothing 10$  mm. Čvrstoća betonske kocke je funkcija prečnika otiska kuglice, a izračunava se na osnovu empirijske formule. Na sličnoj zarnišli počiva još i niz drugih aparatura. U primeni su i aparature zvane *sklerometri* kojima se određuje površinska tvrdoća materijala zarezivanjem. «Sklerometrima» nazivaju se, u poslednje vreme, i manje ručne aparature koje rade «na udar» po sličnom principu kao originalni Gaedeov čekić; zadovoljavaju u cilju dobijanja približnih orientacionih podataka. U nas se dosta primenjuje Schmidtov sklerometar iz Švajcarske.

Poslednjih godina vrlo je razvijen metod ispitivanja na bazi *zvučnih i ultrazvučnih impulsa*. Naročito se razvilo ispitivanje pomoću tzv. elektro-sonometara, kojima se na osnovu merenja ultrazvučne frekvencije mogu odrediti izvesne osobine u raznim pravcima, zatim modul elastičnosti i druge konstante materijala. Daljni metodi ispitivanja zasnivaju se na merenjima pomoću Röntgenovih zrakova i pomoću gama-zrakova. (V. *Ispitivanje bez razaranja*.)

*Čvrstoća na zatezanje* betona može biti od interesa naročito za neamirane konstrukcije izložene manjim naponima na zatezanje pri savijanju, kao što su npr. betonski kolovozi. Čvrstoća betona na zatezanje, odn. savijanje, može se unekoliko povećati primenom cemenata veće čvrstoće na savijanje; ovakvi cementi imaju obično manju sadržinu CaO. Značajniji uspesi postignuti su u poslednje vreme dodavanjem vlaknastih agregata velike čvrstoće na zatezanje, kao što su veštacka (sintetička) ili prirodna vlakna (azbest i dr.). Time je uspelo čvrstoću betona na zatezanje povećati na trostruko. Ispitivanje čvrstoće na zatezanje vrši se opterećenjem probnih gredica na savijanje do sloma. Pri opterećenju sa dve simetrične sile dobija se prosečno manja vrednost nego pri opterećenju jednom silom u sredini raspona.

Dalji, noviji način ispitivanja te čvrstoće (tzv. brazilske) sastoji se u tome da se ispituju betonski cilindri po izvodnicu, i to na pritisak, a čvrstoća na zatezanje se izračunava po obrascu:

$$\beta_z = \frac{2 P_{\max}}{\pi d l},$$

gde je  $P_{\max}$  sila pri slomu, koji nastupa u vidu cepanja cilindra na dve polovine,  $d$  prečnik cilindra (obično 12 ili 15 cm),  $l$  dužina cilindra (obično 2  $d$ , izuzetno 3  $d$ ).

Savremena ispitivanja čvrstoće na zatezanje sprovode se i aksijalnim zatezanjem betonskih cilindara čija se oba kraja na potreboj

dužini stavlju u metalne čahure, u koje se pričvršćuju lepilom vrlo velike otpornosti.

**Modul elastičnosti.** Beton se pri naprezanju deformeše prema eksponentijalnom zakonu

$$\sigma = E e^n,$$

gde je  $\sigma$  napon,  $E$  modul elastičnosti,  $e$  specifično deformisanje,  $n$  eksponent veći od 1.

Modul elastičnosti menja se u zavisnosti od naprezanja. Najveći modul betona  $E_0$  odgovara neopterećenom materijalu. Ovaj je modul inače identičan sa tzv. *dinamičkim modulom* koji se dobija kada se materijal napreže do  $\sigma_1$  pa se onda rastereti do  $\sigma_{II}$ , pri čemu se stvara petlja histereze; ako se taj postupak ponavlja više puta, linija rada u dijagramu se stabilizuje u vidu usko spljoštenog prstena (sl. 21). Spojnica dijagonalno suprotnih tačaka tog prstena  $A-A'$  zatvara sa osom apscise ugao  $\alpha$  koji je po veličini identičan ugлу  $a_0$ . Tangens ovog ugla daje  $E_0$  odnosno  $E_{din}$ .

Premda našim propisima, u statičkim proračunima se uzima da je modul elastičnosti staljan, veličine  $E = 210\,000 \text{ kp/cm}^2$ , što odgovara jednoj desetini modula elastičnosti čelika. Druge zemlje propisuju različite odnose modula elastičnosti čelika i betona, uglavnom između 8 i 15; ponegdje se predviđaju i promenljivi moduli, zavisni od prirode opterećenja.

Stvarno se modul elastičnosti teškog betona za konstrukcije kreće od  $\sim 140\,000$  do  $\sim 500\,000 \text{ kp/cm}^2$ , zavisno od kvaliteta. Laki betoni imaju znatno manji modul, sve do  $\sim 5\,000 \text{ kp/cm}^2$ . Modul elastičnosti se povećava kada se prilikom izrade betona primenjuju pravila izrade što boljeg betona, dakle: ispravan granulometrijski sastav, čist agregat, mali vodocementni faktor, povoljan oblik zrna. Viši modul elastičnosti kamenog agregata utiče povoljno na visinu modula betona. Posni betoni imaju niski modul elastičnosti; on se povećava sa većom količinom cementa, ali samo do odredene granice ( $\sim 400 \text{ kg cementa na m}^3$  gotovog betona), a zatim se smanjuje. Modul elastičnosti povećava se sa starošću betona.

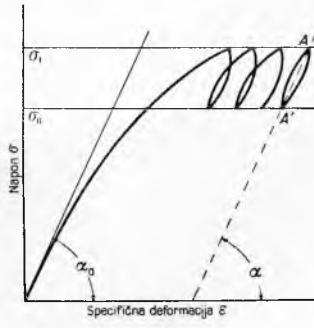
Navedeni podaci o veličini modula elastičnosti odnose se na modul kao osobinu materijala napregnutog na pritisak. Modul elastičnosti pri zatezanju znatno je manji od prethodno navedenog. Sasvim približno može se prepostaviti da modul elastičnosti na zatezanje iznosi 0,8 analognog modula na pritisak.

*Iznalaženje modula elastičnosti* postavlja se kao bitno u mnogim slučajevima u praksi, naročito prilikom ispitivanja konstrukcija i proračunavanja napona na osnovu deformacija. U tom slučaju treba operisati sa stvarnim, a ne sa pretpostavljenim modulom. Ispitivanje i utvrđivanje veličine modula elastičnosti vrši se u laboratorijama opterećivanjem probnih ugleda (prizmi, cilindara) u istraživačkoj mašini, u granicama dopuštenih napona, i merenjem deformacija (tenzometrima, aparatom sa zrcalima, trakama za merenje i dr.). U tom cilju ugledi se mašinskim sečenjem vade iz konstrukcije, ili se, pak, rade specijalne epruvete. Noviji metodi kojima se putem vibracija iznalaži dinamički modul elastičnosti (ultrazvuk, električna analiza, visokofrekventni pulsatori i dr.) omogućuju postupak bilo u laboratoriji bilo i na terenu. Veličina dinamičkog modula elastičnosti redovno je veća od one koja se dobija statičkim postupcima.

Tehničke teškoće u vezi sa utvrđivanjem stvarnog modula elastičnosti dovele su do stvaranja empirijskih obrazaca namenjenih proračunavanju modula iz čvrstoće betona. Najpoznatiji između njih, obrazac švajcarskog zavoda EMPA, glasi u nešto modifkovanim obliku

$$E_b = \frac{600\,000 \cdot 0,75 \kappa \beta_p}{180 + 0,75 \kappa \beta_p},$$

gde je  $\kappa \beta_p$  čvrstoća betonske kocke.



Sl. 21. Dinamički modul elastičnosti betona

Za marke betona 160 i više, sa uspehom se kod nas primenjuje i obrazac

$$E = 150\,000 + 400 \kappa \beta_b,$$

koji daje nešto niže vrednosti od ranije navedenog.

**Otpornost na udar.** Ova je osobina od interesa naročito za objekte pasivne zaštite i za fortifikacione radove. Udaru su izložene i druge konstrukcije u građevinarstvu: železnički pragovi, kolovozi, postolja mašina i dr. I potresi mogu izazvati posledice sličnog karaktera kao udari. Beton je sam po sebi u pogledu otpornosti na udar inferioran zidu od lomljenog kamena ili opeke. Njegova otpornost i u ovom smislu može se povećati armiranjem. Elementi izloženi udarima u raznim pravcima armiraju se u sve tri dimenzije; pogodne su česte spiralne armature. Kao dopunske mere za ove potrebe preporučuju se one koje se inače primenjuju pri izradi betona visoke otpornosti i uvećanog otpora na zatezanje, zatim dodaci kojima se povećavaju te čvrstoće: azbestna i veštačka vlakna velike čvrstoće na zatezanje, parčad metalne žice, čelična strugotina i dr. Konstruktivne elemente kao što su postolja, temelji, pragovi i dr. treba na mestu prenosa udara prekriti »prigušivačima« tj. plastičnim izolacionim materijalom visokog kvaliteta.

Ispitivanje na udar vrši se, za izvesne potrebe, na način predviđen za ispitivanje kaldrme, tj. udarima malja koji slobodno pada; pri tom se visina pada postepeno povećava sve do sloma. Pokazatelj otpornosti je čvrstoća na udar:

$$\beta_{udar} = \frac{R}{Z}.$$

U toj formuli je  $R$  celokupni rad potreban za razbijanje,  $Z$  zapremina ugleda. Ako je  $R$  izražen u  $\text{kp cm}$ , a  $Z$  u  $\text{cm}^3$ ,  $\beta$  se dobija u  $\text{kp/cm}^2$ .

Ugledi za ovu svrhu, u vidu kocki, moraju se iseći iz većih betonskih blokova.

Ispitivanja za fortifikacione i slične potrebe mora da se vrše odgovarajućim ubojnim sredstvima i postupcima.

Železnički pragovi i neki drugi elementi ispituju se i na dinamička dejstva vibracionog karaktera specijalnim uređajima, tzv. pulsatorima.

**Otpornost na habanje.** Beton za kolovoze, sa gledišta habanja, mora zadovoljavati vrlo stroge uslove. Beton kolovoza provklasnih autostrada ne bi trebalo da ima veći koeficijent habanja od  $12\cdots15 \text{ cm}^3$ , što odgovara veličini habanja dobrog kamena krečnjaka. Za sporednje kolovoze, pešačke staze i podove, koeficijent habanja može biti veći, s tim da ne prelazi  $25\cdots27 \text{ cm}^3$ . Otpornost na habanje može se, strogo primenjujući ostala pravila izrade dobrog betona, povećati upotreboti agregata od kamena visoke otpornosti na habanje (naročito kamena magmatskog porekla: granita, gabra, kvarcporfira i dr.), kao i sitnog kvarcnog peska, u granicama granulometrijskog sastava predviđenog propisima.

Samo »masniji« betoni, tj. betoni sa oko  $300 \text{ kg cementa/m}^3$ , mogu biti dobro otporni na habanje; vrlo posnim betonima se uopšte ne može postići zadovoljavajuća otpornost. Ugradivanje smelo bi se vršiti samo vibracionim postupcima.

Tzv. *tvrdi betoni*, izloženi naročito velikom habanju, stvaraju se dodavanjem vrlo tvrdih sastojaka, kao što je veštački korund, silicijski karbid, čelični prah, čelična strugotina i dr.

Ispitivanje na habanje vrši se, analogno kao za prirodnji kamen, na Boehmeovu stolu, na ugledima stranica  $50 \text{ cm}^2$ , isečenim iz većih betonskih blokova. Ugledi se pre ispitivanja suše na  $+105^\circ\text{C}$ . Pokazatelj veličine habanja je *koeficijent habanja*, tj. zapremina u  $\text{cm}^3$  ishabana u toku kompletног opita (440 okretaja stola); merodavan je prosek od 3 opita.

**Propustljivost za vodu.** Ova je osobina od najvećeg značaja za beton primenjen u hidrotehničkim radovima. Za neke svrhe, npr. za gravitacione brane, nepropustljivost se zahteva na prvom mestu. Apsolutna nepropustljivost betona ne može se uvek postići, ali se savremenim tehnološkim postupcima stepen propustljivosti može smanjiti do minimuma. Propustljivost, inače, zavisi od gustine materijala, tj. od broja i veličine pora u materijalu, ali i od položaja i raspodele pora, te se pouzdano može da utvrdi samo eksperimentom.

Glavna pravila za izradu što manje propustljivog betona za masivne hidrotehničke konstrukcije su sledeća:

Kao vezivno sredstvo dolazi u obzir samo cement malog razvijanja topoteke prilikom vezivanja (hidratacione); to su metalurški, pucolanski i njima slični cementi, supersulfatni cementi, zatim cementi sa uvučenim vazduhom. Njihov hemijski sastav treba da zadovolji i ranije navedene uslove u vezi sa petrografskim karakteristikama agregata (u slučaju prisustva opala, feldspata i nekih drugih minerala). Hidratacione topoteke, konstatovana u izotermičkom kalorimetru, ne bi trebalo posle 7 dana da je veća od 65 kcal/kg. Veća finoća mlinova cementa utiče pozitivno na gustinu betona.

Nepovoljno dejstvo primene cementa male hidratacione topoteke jeste uvećana opasnost pri betoniranju na niskim temperaturama, o čemu treba voditi računa.

Količina cementa, zbog nepovoljnih uticaja skupljanja, ne bi trebalo da pređe  $250 \text{ kg/m}^3$ , ukoliko se pored nepropustljivosti za vodu ne zahteva visoka čvrstoća betona.

Aggregat mora da je od zdravih stena, nenačet, postojan na mrazu, lišen organskih primesa i glinenih opni. Povoljniji su obli aggregati, naročito kad je u pitanju pesak. Roš predlaže za masivne brane krvu granulacije »TS 1955« za krupne aggregate maksimalnog prečnika ( $D$ )  $80\text{--}150 \text{ mm}$ . Jednačina predložene krive granulacije glasi:

$$P = \frac{10}{9} \left( 100 \sqrt[3]{\frac{d}{D}} - 10 \right).$$

Ova kriva važi samo za slučajeve  $d \geq \frac{D}{1000}$ . Povoljna krupnoća

maksimalnog zrna u ovom je slučaju  $120 \text{ mm}$ . Pri spravljanju treba svakako pojedine frakcije dodavati odvojeno.

Vodocementni faktor, zavisno od prirode aggregata (naročito njegova procenta upijanja vode i oblika i sastava zrna) i debljine elementa, eventualno i gustine armature, načelno se kreće od 0,48 do 0,54. Stvarno potrebni vodocementni faktor treba utvrditi opitom na gradilištu.

Da se smanji propustljivost za vodu, betonu se mogu dodati izvesni *prirodni ili veštacki dodaci*. Ovi dodaci mogu biti:

1) Prašinaste materije koje se upotrebljavaju kao isplina šupljina (»filler«). Za ovu svrhu upotrebljava se često bentonit, vrsta gline vrlo velike sadržine  $\text{SiO}_2$  (oko 64 %), kao i silicijska dijamonska zemlja. Ovim i sličnim dodacima znatno se povećava plastičnost materijala, što povoljno utiče na njegovu obradljivost, a ujedno se usporava i vezivanje cementa. Slično dejstvo imaju i druga, veštacka sredstva poznata pod imenom *plastifikatori*. O njima je bilo reći u pasusu o aditivima. Svim ovim postupcima krajnji je cilj smanjivanje količine vode time što se ona ne iskoristiće za »podmazivanje« zrnaca koja se opiru ugradnjivanju, već se za ovu svrhu upotrebljavaju gore navedene materije, koje ulaze u granulometrijski sastav aggregata.

2) Materije koje odbijaju vodu. Kao dobri dodaci sa tog gledišta pokazali su se naročito kalcijevi, amonijevi i aluminijevi stearati, masne kiseline, sapuni i ulja, emulzije i dr.; cilj je njihova dodavanja da se beton liši njegove osobine apsorpcije vode i vlage. To se postiže zahvaljujući tankom filmu koji se obrazuje na površini i koji odbija vodu; materije se dodaju u tečnom ili prašinastom obliku ili u obliku paste.

3) Sredstva koja u betonu stvaraju vazdušne pore. To su ista sredstva koja se upotrebljavaju i za izradu betona otpornog na mraz; neka između njih dejstvuju ujedno i kao plastifikatori.

Ispitivanje propustljivosti za vodu vrši se na ugledima oblike standardne kocke  $20 \times 20 \times 20 \text{ cm}$ , kocke  $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}$  ili na pločastim ugledima. Materijal se pri tom izlaže dejstvu vode pod pritiskom od 1, zatim od 3 pa sve do 7 atmosfere, ali i znatno većim. Kriterij je dubina prodiranja vode u beton. Po izvršenom ispitivanju propustljivosti, betonske kocke se ispituju i na pritisak.

**Upijanje vode i otpornost prema mrazu.** Veličina upijanja vode u tesnoj je zavisnosti od poroznosti betona. Ukupna količina pora nije jedini merodavni pokazatelj, jer veličina upijanja zavisi i od oblika i veličine pojedinih pora. Stepen upijanja vode daje nekoliko i indikaciju za otpornost materijala na mrazu.

Fenomen razaranja usled dejstva mraza zasniva se na povećanju zapremine vode za 9 % pri zaledivanju; kada time izazvani naponi na zatezanje pređu čvrstoću na zatezanje zidova kapilarnih pora,

nastaje razaranje materijala, obično iznutra prema napolje. Nije međutim sigurno da li ovo razaranje u unutrašnjosti materije izaziva sam led ili voda pod pritiskom. Prema hipotezi Powersa, led koji se formira najpre na periferiji, tera pri svom uvlačenju u unutrašnjost materijala ispred sebe vazduh i vodu koja se nije zaledila. Vazduh se pri tom istiskuje na lak način, dok se tečna voda, usled povećanja zapremine, u delimično zaledenim porama nalazi pod jakim pritiskom. Pri većem porastu pritiska, savladavanjem čvrstoće na zatezanje stvrdnutog cementnog lepa, dolazi do lokalnog sloma. Pri tom se izazivaju ogromni pritisci, što znači da voda u unutrašnjosti betona ne mora biti zaledena ni pri temperaturi znatno ispod  $0^\circ\text{C}$ .

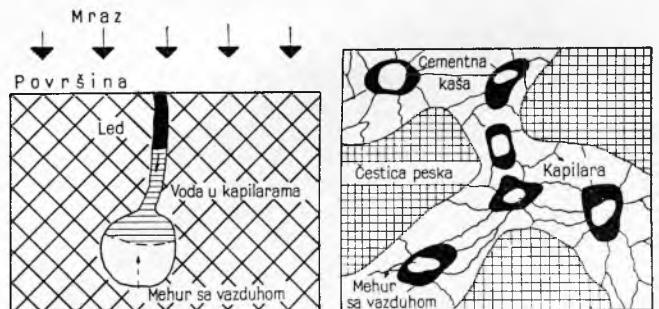
Powers je uticaje svih faktora na veličinu hidrauličnog pritiska u betonu prikazao obrascem koji glasi:

$$P = a \left( 1,09 - \frac{1}{s} \right) \cdot \frac{UR}{K}.$$

U njemu je  $a$  faktor koji zavisi od viskoziteta vode,  $s$  koeficijent zasićenosti koji predstavlja odnos zapremine prisutne kapilarne vode i pune zapremine kapilara,  $U$  težina vode u jedinici težine cementa koja se smržnjava kada temperatura pada na  $1^\circ\text{C}$ ,  $R$  koeficijent hlađenja zavisan od oblika, obima i volumena konstruktivnog elementa,  $K$  koeficijent propustljivosti za vodu. Kad je  $s = 0,917$ , postaje  $P = 0$ , te pri ovolikoj ili manjoj zasićenosti teorijski neće biti pritiska niti opasnosti od mraza. Koeficijent hlađenja  $R$  smanjuje se s povećanjem odnosa zapremine i površine, kao i boljom izolacijom betona.

Otpornost na mraz postiže se normalno izradom gustog betona i brižnim odabiranjem aggregata, koji mora da je sam po sebi otporan na mraz a u svakom slučaju da je veće zapreminske težine od  $2,4 \text{ kg/dm}^3$ . Kao sumnjičivi važe, pored ostalog, porozni krečnjaci i uopšte svaki kamen velike poroznosti. Agregat ne sme imati primese humusa, a može imati samo nezнатне primese gline. Preporučuje se cement veće brzine hidratacije (visokovredni); veća količina cementa u  $\text{m}^3$  betona utiče povoljno.

Kao beton postojan na mraz smatra se onaj koji je sposoban da se opire često ponavljanom smržnjanju i otkravljinju. U današnjim uslovima takav beton može biti samo *beton sa uvučenim (upijenim) vazduhom*. To je posleratni američki pronalazak (*air-entrained concrete*) koji počiva na utvrđenoj pojavi da male količine vazduha, vrlo gusto raspoređenog po celoj zapremini betona u vidu mikroskopski sitnih loptastih mehurića, znatno povećavaju otpornost prema mrazu i prema naizmeničnom smržnjanju i kravljenju; one takođe povećavaju nepropustljivost betona kao i njegovu otpornost prema agresivnim hemijskim uticajima. Mehurići vazduha stvaraju se za vreme izrade betona posredstvom izvesnih masnih materija, mineralnih ulja, biljnih i drugih ekstrakata, koji se dodaju bilo pri spravljanju betona



Sl. 22. Mehuri u betonu sa uvučenim (upijenim) vazduhom (levo: voda pod pritiskom; desno: raspored mehura sa ledom)

bilo pri izradi cementa, kao dodatak klinkeru. Ove loptaste pore presecaju kapilare, pa voda, kad nađe na te sferne šupljine, smanjuje pritisak na stenke pora. Količina finih vazdušnih mehurića iznosi  $\sim 3\text{--}4\%$  celokupne zapremine betona. Ovi mehurići se samo izuzetno mogu videti golim okom; prečnik mehurića loptastog oblika kreće se od  $0,06$  do  $\sim 0,6 \text{ mm}$ . Betoni sa uvučenim vazduhom, koji su teški betoni, ne smeju se ni u kom slučaju zamjeniti sa lakinim, čeličastim betonima, kao što su gas-betoni i dr. Na sl. 22 vidi se, levo, uvećani mehur sa zaledenom kapilarom i vodom

pod pritiskom; desno se vide mehurovi sa ledom i zbijenim vazduhom, raspoređeni u stvrdnutom cementnom lepu.

Ispitivanje procenta upijanja vode u vrši se sušenjem ugleda do stalne težine  $T_s$  i njihovim potpunim zasićivanjem u hladnoj vodi sve dok se primećuje ma kakav porast težine ugleda. Ako je konačna konstantna težina  $T_{zas}$ , izračunava se procenat upijanja vode po obrascu:

$$u = \frac{T_{zas} - T_s}{T_s} \cdot 100\%.$$

Ispitivanje otpornosti prema mrazu vrši se, u našim uslovima, sa vodom zasićenim ugledima koji se 25 puta u toku od po 4 časa u hladnjači izlažu mrazu od  $-15^{\circ}\text{C}$ , a zatim se 2 časa otkravljaju u vodi od  $+15^{\circ}\text{C}$ . Po završenom ispitivanju beton mora ostati nerazoren, kompaktan, bez naprslina, ljuštenja i krunjenja na površini, dakle bez bitnih karakteristika mrazom oštećenog betona. Roš predlaže 50 ciklusa, s time da po završenom ispitivanju modul elastičnosti  $E$  ne sme biti smanjen za više od 25%.

**Skupljanje i bubrenje.** Skupljanjem betona označava se njegova osobina da prilikom sušenja smanjuje svoju zapreminu približno u сразмери sa gubitkom vlage. Zbog toga je skupljanje na vazduhu u početku procesa očvršćavanja najveće, ali se produžava mesecima (obično oko 6 meseci), a može i godinama. Napredovanje skupljanja zavisno je ne samo od vremena već i od temperature i vlažnosti vazduha. Zato se ova pojava može istraživački pravilno obuhvatiti ako se ugledi do dana ispitivanja čuvaju u klimatiziranim prostorijama gde vlada stalna temperatura i vlaga.

Kada beton prima vlagu, on *bubri*, tj. povećava zapreminu.

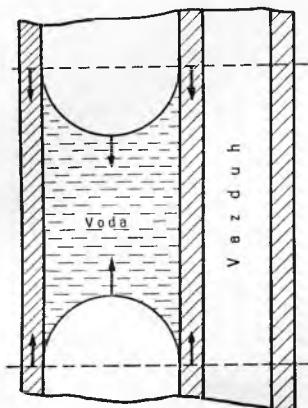
Maksimalna veličina skupljanja kreće se, zavisno od vrste betona, između 0,2 i 0,4%; bubrene je obično manje.

Prema Freyssinetu, skupljanje je posledica napona na zatezanje u meniskusima vodoin ispunjenih pora betona; ovi naponi prenose se na zidove pora na način prikazan na sl. 23, pri čemu se približavaju preseci između nasuprotnih meniskusa iste pore. Kako su pore razmeštene u raznim pravcima svakog betonskog tela, to i proces skupljanja dolazi do izražaja u sve tri dimenzije, dakle zapreminske. Pore ispunjene samoj vazduhom ne pridonose pojavi skupljanja.

Skupljanje i bubrenje su nepoželjne osobine betona. Naročito štetno deluju kad je usled spoljnih uticaja, npr. zbog priranjanja armature za beton ili zbog konstruktivne povezanosti elemenata, sprečeno slobodno deformisanje betona. Ovo dovodi, naročito u slučajevima kad se skupljanje i bubrenje često izmenjuju, do napona koji su uzroci prslina, što može negativno da utiče i na otpornost betona na mraz.

Na veličinu skupljanja naročito utiče količina cementa (masniji beton se jače skuplja od posnog), zatim količina vode za spravljanje. U praksi se sa tog gledišta ne preporučuje količina cementa veća od  $300 \text{ kg/m}^3$ . Na povećanje skupljanja utiče i prisustvo kamenog praha, topioničke zgure i pučolana, kao i slobodnog kreča ( $\text{CaO}$ ) prisutnog u cementu u količini većoj od 1%. Skupljanje se smanjuje sa porastom relativne vlažnosti vazduha. Povoljno dejstvo ima dobra nega betona u prvim danima njegova očvršćavanja; preporučljivo je da se intenzivnim kvašenjem betona u prvih 7 dana smanji početno skupljanje. Ono se može smanjiti i primenom podesnih konstruktivnih mera, naročito povoljnijim armiranjem.

Ispitivanje skupljanja betona vrši se pomoću prizama, npr. veličine  $10 \times 10 \times 50 \text{ cm}$ , koje se ostavljaju u klimatiziranim prostorijama. Veličina skupljanja meri se svakog dana, počev od 24. sati posle spravljanja, u toku više meseci. Mere se odstojanja ugrađenih repera pomoću vrlo preciznih instrumenata; rezultati se izražavaju u  $\text{mm/m}$ . Ukoliko se ispituje bubrenje, postupa se na isti način, s time da se ugled stalno drži u vodi.



Sl. 23. Skupljanje kapilara sa vodom

**Stinjavanje (puzanje).** Sa ovom osobinom upoznao je širu stručnu javnost na vrlo ubedljiv način 1926 francuski konstruktor i istraživač Freyssinet svojim delom *Une révolution dans les techniques du béton*. Stinjavanje se sastoji u tome da se u konstrukcijama od nearmiranog, armiranog i prednapregnutog betona, ukoliko su izložene trajnom opterećenju većeg značaja, pored elastičnih ili kvazielastičnih deformacija — koje inače prate svako naprezanje i javljaju se kad i izazvani naponi — pojavljuju takođe i dodatne plastične deformacije koje sporo i postepeno dolaze do potpunog izražaja. Npr. stubovi opterećeni na pritisak, pored prvobitne elastične deformacije, trpe dalje deformisanje u vidu njihova skraćivanja, koje traje godinama.

Ova se osobina u suštini svodi na iste uzroke kao skupljanje betona, dakle na izmenu strukture pora, s tim da je ona uvećana usled trajnog prednapona — stalnog opterećenja. Sa tog gledišta se i samo skupljanje može shvatiti kao stinjavanje sa prednaponom ravnim nulim.

Priroda stinjavanja nije do sada u potpunosti objašnjena. Ipak, kao donekle dokazane mogu da se navedu sledeće činjenice.

Najveće stinjavanje javlja se neposredno posle opterećenja. Ono se produžava u toku od 5...10 godina, ali se 70...80% veličine ovog deformisanja pojavljuje u toku prve godine. Stinjavanje je manje ako je starost betona u momentu nanošenja stalnog tereta bila veća. Veličina stinjavanja ne zavisi neposredno od čvrstoće betona, već od odnosa napona od stalnog tereta prema čvrstoći betona. Stinjavanje je u toku prve faze očvršćavanja veće kad je beton nezaštićen nego kad se zaštićuje vlagom. Približno do napona ravnog 85% čvrstoće betona, veličina stinjavanja je proporcionalna naponu, a pri većem opterećenju raste u većoj razmeri. Pri malim naponima stinjavanje je približno jednak pri opterećenju na pritisak i na zatezanje. U većim presecima javlja se manje stinjavanje nego u malim, i obratno. Pri stinjavanju u uzdužnom pravcu ne javlja se bočne deformacije. Posle odstranjivanja stalnog tereta smanjuje se veličina stinjavanja za dobar procenat.

Do sada nije sa sigurnošću utvrđeno da li stinjavanje utiče na otpornost betona ukoliko su naponi od stalnog tereta manji od 85% čvrstoće betona. Današnji autoritet u oblasti neelastičnog ponašanja materijala, američki profesor Freudenthal, navodi da je dostizanje krajnjih napona izazvanih plasticitetom betona praćeno izvesnim lokalnim razaranjem kohezije i unutarnjim oštećivanjem materijala. Ova suštinska razlika u gledištima izazvala je velike istraživačke akcije u međunarodnoj razmeri, koje još nisu okončane.

Fenomen stinjavanja u praksi može da ima naročitog uticaja u vezi sa stvaranjem prethodno napregnutih konstrukcija čijim su elementima dati jaki prednaponi.

Pojam inverzan stinjavanju, tj. smanjivanje napona u slučaju sprečenog deformisanja (npr. skraćivanja) naziva se *relaksacijom*.

Da se smanji veličina stinjavanja, danas se, pored primene opštih mera za izradu dobrog betona, preporučuje primena cementa visoke vrednosti, izrada masnijih betona (čime se, međutim, povećava skupljanje), povećanje udela maltera u betonu, upotreba oblih agregata umesto drobljenih, duže stajanje betona u oplati i na skeli.

Ispitivanje veličine stinjavanja vrši se tako da se prizmatična ili cilindrična betonska tela u klimatiziranim prostorijama stavljuju pod pritisak u neku napravu u kojoj besprekidno ostaju godinama; taj jaki pritisak izazivaju npr. snažne spiralne opruge. Deformacije se mere instrumentima visoke preciznosti u odredene dane tokom više godina.

**Toplotno istezanje** betona je približno isto toliko kao toplotno istezanje čelika; ova činjenica omogućila je stvaranje armiranog betona kakav danas pozajemo. Načelno se uzima da veličina koeficijenta toplotnog istezanja  $\alpha$  iznosi  $0,000\ 01$ , što znači da se betonski štap dužine 1,00 m pri zagrevanju za  $1^{\circ}\text{C}$  isteže za 0,01 mm. Masni betoni imaju unekoliko veće  $\alpha$  od posnih, pa se i stvari  $\alpha$  kreće u granicama 0,000 009 5 do 0,000 014. Ovo se meri na prizmatičnim telima osušenim do konstantne težine i zagrevanim električnim putem od  $+20^{\circ}\text{C}$  do  $+80^{\circ}\text{C}$ . O ovom znatnom istezanju treba voditi računa prilikom konstruktivnog rešavanja: projektovanjem dilataционих razdelnica i uzimanjem u obzir napona proizašlih od topotnih razlika u statički neodređenim sistemima.

**Toplotna provodljivost** od velikog je interesa za beton koji se upotrebljava za zidove i druge konstrukcije stambenih i njima sličnih zgrada. Koeficijent topotne provodljivosti  $\lambda$  je količina topote u kilokalorijama koja u toku jednog časa prolazi kroz  $m^2$  zida debljine 1 m, kad razlika u temperaturi jedne i druge strane zida iznosi  $1^\circ\text{C}$ . Kao osnova za upoređenje veličina topotne sprovodljivosti uzima se klasično zide od pune opeke u krečnom malteru, čija je prosečna provodljivost u potpuno suvom stanju

$$\lambda = 0,51 \dots 0,55 \text{ kcal/m h } ^\circ\text{C}.$$

Materijali čija je provodljivost znatno veća od pomenute važe kao loši topotni izolatori i zbog toga se izbegavaju u izradi zidova i tavanica stambenih i sličnih zgrada. U red ovih materijala spada i obični nearmirani beton sa  $\lambda \approx 1,15 \dots 1,2$  i armirani beton sa  $\lambda \approx 1,30 \dots 1,35 \text{ kcal/m h } ^\circ\text{C}$ . S druge strane, laki betoni mogu imati provodljivost približno jednakoj onoj koja odgovara zidu od opeke (beton od kotlovske šljake ima  $\lambda = 0,6$ ), ali i znatno nižu (čelijski betoni), dooko  $\lambda \approx 0,1$ . Ovi navedeni podaci važe za potpuno suv materijal. Vlaga u porama, kao bolji topotni provodnik od mirnog vazduha, u znatnoj meri smanjuje izolacionu moć materijala.

Ispitivanje topotne provodljivosti je specifičan postupak koji zahteva obimnije ispitivačke uređaje i preduzimanje niza stručnih mera. Ono se danas provodi u relativno malom broju laboratorijskih po različitim metodama; izvesni metodi već su godinama predmet proučavanja u međunarodnoj razmeri.

**Otpornost u vatri.** *Otpornima prema požaru* smatraju se gradevinske konstrukcije koje opit na požar izdrže u toku od  $\frac{1}{2}$  sata a da se pri tom ne zapale, i za to vreme sprečavaju prolaženje vatre bez smanjenja moći nošenja i stabilnosti. Kao *postojane na požaru* smatraju se konstrukcije koje se bar  $1\frac{1}{2}$  sata suprotstavljaju dejstvu požara, a zatim dejstvu gašenja vodom, sprečavajući pri tom prolaženje vatre kroz konstrukciju a da joj se ne smanjuje bitno moć nošenja i stabilitet. Betonski i armiranobetonski zidovi debljine preko 10 cm važe kao postojani, a isto tako i stubovi debljine 38 cm. Armatura treba da je pri tom prekrivena slojem betona debljine najmanje 2,5 cm; za slučajevi veće opasnosti od požara preporučuju se i jači zaštitni slojevi, do 5 cm.

Od ove otpornosti treba razlikovati *vatrostalnost* betona, tj. sposobnost da zamenuje vatrostalni materijal (npr. u visokim i drugim topioničkim pećima). Dugotrajni optiti pokazuju da je beton u potpunosti stalan u vatri samo do temperature oko  $500^\circ\text{C}$ ; već na  $600^\circ\text{C}$  čvrstoća mu se znatno smanjuje, a iznad  $900^\circ\text{C}$  nastaju veća oštećenja. Danas se proizvode betonski elementi koji su otporni na traženoj temperaturi ili su pak vatrostalni. Rade se od aluminatnih cemenata i veštačkog ili prirodnog agregata visoke postojanosti u vatri (šamota, boksita, magnezita, karborunduma). Kao zadovoljavajući agregat smatra se i topionička zgura i drobljena opeka. Za temperature ispod  $900^\circ\text{C}$  može se upotrebljavati i kamen krečnjak koji se tek na  $\sim 900^\circ\text{C}$  raspada na  $\text{CaO}$  i  $\text{CO}_2$ . Silicijski agregati ponašaju se u vatri daleko slabije od krečnjačkih stena i zataje na mnogo nižim temperaturama.

**Provodljivost zvuka.** Teški beton slabo provodi zvuk koji dopire do njega rasprostirući se kroz vazduh, kao govor, pevanje, sviranje na muzičkim instrumentima itd. Laki betoni znatno bolje provode tako rasprostiran zvuk.

Nasuprot tome, teški monolitni betoni vrlo slabo izoluju od zvuka koji je izazvan sudarom čvrstih tela, npr. pri hodanju po čvrstoj podlozi, udaranju, kucanju itd. Zbog toga teški beton i važi kao slab zvučni izolator. Sa tog gledišta se mnogo boljim smatraju laki betoni, a donekle i zidovi od teškog betona u blokovima.

Rasprostiranje zvuka od hodanja ublažava se podlogama i pokrivačima od pluta, gume i dr., ali i konstruktivnim merama, naročito izoliranjem sastava podova i zidova, koji ne treba da su uzajamno čvrsto povezani.

**Otpornost prema agresivnim hemijskim uticajima.** Beton je u znatnoj meri podložan razornom dejstvu usled hemijskih uticaja.

**Bazična jedinjenja,** naročito kalcijevi i natrijevi hidroksidi, sa kojima beton najčešće dolazi u dodir, nisu štetni; to isto važi i za amonijak.

Štetne su sve *kiseline*, naročito *anorganske*, na prvom mestu  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HNO}_3$  i  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , jer stvaraju nepostojane soli sa Ca, kojeg u cementu ima obilno. U praksi su česti slučajevi agresivnog uticaja sumporaste kiseline koja se stvara u dimnim plinovima, naročito pri izgaranju uglja slabijeg kvaliteta; od ovog trpe, pre svega, obloge u železničkim tunelima i druga železnička i industrijska postrojenja. Ugljena kiselina sa Ca u betonu najpre stvara  $\text{CaCO}_3$ , koji se u vodi ne rastvara, ali se docnije može pretvoriti u kalcijev bikarbonat  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ , koji je u vodi rastvorljiv.

U manjoj su meri štetne i sve *organske kiseline*, pogotovo sirčetna i mlečna kiselina; alkoholna pića, naročito vino i pivo, ne smeju se stavljanuti u nezaštićene betonske sudove. Čisti alkohol nije štetan; isto tako nisu štetni benzin ni benzol.

Od soli su štetna sva jedinjenja sumpora (sulfati, sulfidi, sulfiti), kao i neki hloridi (magnezijev i amonijev hlorid). Uticaj hlorida manje je štetan od uticaja sulfata, a sastoje se poglavito u tome što hloridi omogućuju pretvaranje slobodnog kreča u cementu u lako rastvorljiv kalcijev hlorid; oni takođe omogućuju stvaranje poroznijeg betona. S druge strane, hloridi mogu u najvećoj meri korozivno uticati na čeličnu armaturu u betonu, te u tom slučaju njihovo prisustvo nije poželjno.

Sulfati mogu izazvati zapreminsku nepostojanost i potpuno raspadanje betona. U nizu sulfata, u većoj su meri opasni oni koji su vezani za slabije baze, a to su poglavito amonijev i magnezijev sulfat, kojeg ima i u morskoj vodi. Sumporna kiselina stvara sa  $\text{CaO}$  u betonu gips, i to posle izvesnog međustadija u kom se stvaraju kalcijevi - aluminijevi sulfati, koji su vrlo razornog dejstva; kristališu sa vodom, povećavaju zapreminu i rasprskavaju beton (cementni bacili).

Štetne su, dalje, sve *masti i ulja*, sem mineralnih, jer deličnim vezivanjem  $\text{CaO}$  u betonu obrazuju krečni sapun. Rastvori koji sadrže šećer štetni su naročito za nedovoljno očvrslje betone.

Svi štetni hemijski uticaji mogućni su samo u prisustvu *vode*, dakle kad je materijal vlažan. Suvom betonu ne škode npr. uticaji dimnih i drugih plinova koji sadrže sumporastu kiselinu. Uzima se da je agresivni uticaj vode na očvrslji beton moguć u sledećim slučajevima: kad je veličina  $\text{pH}$  manja od 6; kad je sadržina sulfata, izražena kao  $\text{SO}_4^{2-}$ , veća od 0,2%; kad je sadržina magnezijeva hlorida veća od 2%.

Štetni uticaj tekuće vode je veći od uticaja vode koja stoji.

Zaštićavanje betona od hemijskih uticaja sastoje se u izradi što gušćih betona prema principima iznetim za postizanje nepropustljivosti betona za vodu, u izradi betona sa uvučenim vazduhom, u primeni cemenata bez slobodnog  $\text{CaO}$ , u primeni cemenata otpornih na dejstvo sulfata kao što su cementi sa relativno manje Ca (metalurški, pucolanski cementi), u dodacima pucolana radi vezivanja slobodnog kreča i dr. Dalje je preko potrebljano da se konstrukcije koje su jače izložene agresiji zaštite konstruktivnim merama, zaštitnim oblogama, premazima i dr. i da se predviđa što manji uticaj izvora agresije.

Ispitivanje na hemijske uticaje vrši se obično tako da se primatična tela ili cilinderi u staklenim sudovima do polovine ili u celosti zarone u rastvore jedinjenja koja su u pitanju, i da se paralelno sa ovim druga, analogna serija izlaže uticaju čiste vode. Ponašanje ugleda se posmatra i upoređuje a ugledi se povremeno težinski mere.

**Uticaj radijacije.** Nearmirani beton, u konstrukciji dovoljne debljine, u stanju je da u znatnoj meri apsorbira radioaktivna zračenja. Međutim, pri dugotrajanom uticaju zrakâ, ovaj beton, sam po sebi, počinje aktivno da zrači; ova osobina čini ga nepodesnim kao zaštitnika od radijacije.

Izradom specijalnih vrsta betona može se postići znatna, pa i potpuna zaštita od radijacije. U tom slučaju beton mora da ima sledeće osobine: a) da potpuno apsorbira neutrone, b) da zaštićuje od  $\gamma$ -zrakâ, c) da zaštićuje od  $\beta$ -zrakâ, koje, opet, indirektno izazivaju  $\gamma$ -zrake, d) da je otporan na temperaturi od  $\sim 250^\circ\text{C}$ .

U cilju izrade betona tih osobina mogu se danas preporučiti niže navedene pravila i postupci.

1. Kao *vezivno sredstvo* dolazi u obzir naročito sintetički anhidrit ili supersulfatni cement. Anhidrit pokazuje vrlo veliku otpornost prema uticaju  $\gamma$ -zraka. Količina primjenjenog vezivnog sredstva je znatna i treba da iznosi do  $\sim 800 \text{ kg/m}^3$  ugrađenog

betona. Beton star 28 dana, izrađen od anhidrita u navedenoj količini, očvršćava i dalje pravilno, i pored uticaja  $\gamma$ -zraka. Inače se takođe upotrebljava visokovredni metalurški cement. Boksitni cement se ne upotrebljava zbog opasnosti od pojave naprsnila usled toplotnog istezanja, ali se primenjuje čisti portlandcement i neke vrste magnezijskog cementa.

Ovde treba imati u vidu da anhidrit nije hidraulično vezivo te da, prema tome, ne može doći u obzir za izradu na mestima na kojim bi se mogao ispoljiti jači uticaj vlage, naročito tečne vode. Isto tako, anhidrit ne podnosi visoke temperature (preko  $110^{\circ}\text{C}$ ) te mu se moraju dodati sintetične materije koje »guše« razvijanje toplotne. S druge strane, anhidrit ne izaziva ni skupljanje ni bubreњe betona, što ga sa ovog gledišta čini idealnim vezivnim sredstvom za navedene svrhe.

2. Primenom vrlo teških *agregata*, a samim tim i izradom vrlo teškog betona može se postići uspešna zaštita kako protiv  $\gamma$ -zraka tako i protiv  $\beta$ -zraka. Ovakav beton mora imati zapreminska težina najmanje  $3200 \text{ kg/m}^3$ , pa sve do oko  $4500 \text{ kg/m}^3$  i najmanju čvrstoću na pritisak  $500 \text{ kp/cm}^2$ . Ovo se postiže primenom vrlo teških krupnih agregata: železne rude, železnog krša, olovnog silikata, sitnih frakcija od barita ili magnezita, baritne i druge topioničke zgure. Često se, pri tome, preporučuje primena diskontinualnog granulometrijskog sastava, u vidu krupnih zrna veličine  $30\text{--}80 \text{ mm}$ , najbolje od magnetita a takođe od limonita ili hematita, odnosno starog železa, olovnih silikata i drugih vrlo teških agregata, zatim finih zrna frakcije  $0\text{--}3 \text{ mm}$  od topioničke zgure, pri čemu je naročito cijenjena ona koja sadrži teški barit. Izvršeni su, međutim, uspešni opiti i sa železnom rudom kontinualnog granulometrijskog sastava  $1/80$ , a kao najfinija frakcija  $0/1$  uzet je kvartitni rečni pesak. U prvom slučaju, dakle kada se primenjuje diskontinualni sastav, postupa se prilikom betoniranja, unekoliko, prema načinu izrade »Pre-pakt-betona«; šupljine između krupnog agregata popunjavaju se malterom.

Prema madarskim podacima se apsorpcija pod pritiskom zнатно povećava kada se železnoj rudi dodaje železni krš (otpaci starog železa) u minimalnoj količini  $400 \text{ kg/m}^3$  betona.

Ukoliko se spravljuju zaštitni betoni radi ublažavanja uticaja moguće radijacije, dakle ne radi punog sprečavanja uticaja zračenja, upotrebljavaju se takođe normalni agregati, naročito kvarci sa anhidritom, uz dodatak ugušivačkog sredstva, npr. 1% polivinilacetata. Ukoliko ovakav beton treba da postigne najmanje marku 220, mora se pri spravljanju uzimati količina veziva najmanje  $700 \text{ kg/m}^3$ . Ukoliko to nije moguće, primenjuju se metalurški cementi visoke otpornosti, baritni pesak i normalni, ali vrlo otporni šljunak.

3. *Vodocementni faktor* u ovom slučaju, zbog primene agregata često velikog procenta upijanja, kreće se pri primeni cementa od 0,5 do  $\sim 0,9$ , a pri upotrebni anhidrita čak je i veći.

4. Uticaj neutrona može se paralizirati dodavanjem jedinjenja bora, u vidu borne kiseline ili boraksa, koji neutrališu ovo vrlo štetno zračenje. Dodatak  $1\text{--}1,5\%$   $\text{H}_3\text{BO}_3$  od količine vezivnog sredstva dovoljan je za ovu svrhu. Ovde treba primetiti da se sa povećanjem dodatkom ovog sredstva usporava vezivanje cementa i smanjuje njegova čvrstoća, o čemu treba voditi računa. U tu svrhu vrše se, takođe, i dodavanja sitnih količina litija i kadmija.

5. *Skupljanje* ovakvog specijalnog betona ne sme da je veće od  $0,3 \text{ mm/m}$ ; o tome treba voditi računa pri konstruktivnom rešavanju.

Kada su u pitanju objekti vrlo osetljivi u pogledu preciznosti dimenzija, npr. reaktori, moraju se prilikom ugradivanja betona preduzeti naročite mere. Primjenjuje se samo metalna oplata, a sveži se beton, radi ograničavanja razvijanja toplotne pri vezivanju, hlađi do temperature oko  $+1^{\circ}\text{C}$ .

#### LAKI BETONI

Laki betoni počeli su da se izrađuju kako bi se eliminisale neke nepovoljne osobine betona koje dolaze do izražaja naročito kada se on primenjuje za izradu zidova i tavanica zgrada za stanovanje. Izradom lako betona ide se za tim da se: 1. smanji zapreminska težina betona, 2. poveća toplotna izolaciona moć ovog materijala time što se smanjuje njegova provodljivost toplotne, i 3. omogući ukucavanje eksera. Laki betoni, sem toga, povećavaju

izolacionu moć od zvuka proizvedenog udarom, dok teški betoni bolje izoluju od zvuka koji se prenosi kroz vazduh. Mnogi laki betoni imaju i druga preimaučstva: lakše se sa njima manipuliše pri građenju, lakše se žbukaju (malterišu) i sa unutarnje i sa spoljne (fasadne) strane zida.

Zapreminska težina laki betona kreće se od 200 do  $1800 \text{ kg/m}^3$ ; ti betoni mogu, dakle, biti i znatno lakši od vode. Samo betoni zapreminske težine veće od  $800 \text{ kg/m}^3$  mogu u izvesnoj meri da zadovolje i sa gledišta moći nošenja. Betoni laciši od ovih važe kao vrlo dobri i odlični toplotni izolatori.

Koefficijent toplotne provodljivosti  $\lambda$ , koji se za normalni, teški beton prosečno kreće od  $1,15$  do  $1,20 \text{ kcal/m h }^{\circ}\text{C}$ , znatno je manji za laci betone; on silazi sve do  $0,1\text{--}0,20 \text{ kcal/m h }^{\circ}\text{C}$ .

Proizvodnja laki betona raste poslednjih godina u vanrednom obimu; oni se najvećim delom proizvode industrijskim postupcima. Danas postoji vrlo velik broj fabrikata svetske reputacije. Mnogi laci betoni poznati su po svojim tvorničkim nazivima, kao npr. »Siporex«, »Iporit«, »Durisol« itd. Ima ih različitih vrsta kako s obzirom na sastav tako i s obzirom na tehnološki proces proizvodnje. Međutim, svima njima je zajedničko to da željene osobine postigu svojom poroznom strukturu; razlika između pojedinih vrsta počiva u načinu kojim oni tu strukturu stvarno dobijaju u produkciji. Pravila za izradu dobrog teškog betona koja su u ovom napisu navedena velikim delom uopšte ne važe za izradu dobrog lako betona, pri čijoj izradi se, načelno, ne ide za tim da se postigne što gušći, mehanički otporni materijal; otpadaju prema tome ranije preporučeni principi o povoljnom granulometrijskom sastavu, o niskom vodocomentnom faktoru, o potrebi savršenog zbijanja svežeg betona itd. Preimaučstva lako betona dobijena su na račun njegove čvrstoće, koja je znatno manja od čvrstoće teškog betona, a gdekad i sasvim neznačna. Laci betoni se načelno mnogo jače skupljaju nego teži, a isto tako mnogo lakše bubre u vodi; o ovoj činjenici treba voditi računa prilikom nege betona u njegovoj početnoj fazi, kao i uopšte pri izradi konstruktivnih elemenata.

Pri izradi laki betona industrijskim putem primenjuju se obično specijalni postupci radi njihova brzog očvršćavanja; o tome će biti reči u narednom poglavju o betonu industrijske izrade.

Raznoliki laci betoni sadanje proizvodnje mogu se svrstati u tri grupe: *betoni s normalnim agregatima specijalnog granulometrijskog sastava*, *betoni s lakiem agregatima i čelijasti betoni*.

**Laci betoni s normalnim agregatima** se izrađuju od normalnih kamenih agregata (krupnijeg peska, šljunka), teške topioničke zgure, drobljene opeke i dr., pri čemu se, sa granulometrijskom gledišta, namerno ne ide za tim da se dobije što gušći, teži i čvršći beton, već što porozniji materijal. Tipičan predstavnik ove vrste betona je *jednozrni beton*, koji se izrađuje samo od jedne frakcije agregata, npr. frakcije  $8/15$  ili  $6/12$ . Krupnoča maksimalnog zrna zavisi, inače, od debljine elementa; nekada iznosi i  $30 \text{ mm}$ , pa i više. Količina cementa za izradu ovih betona ne treba da pređe  $200 \text{ kg na m}^3$ . Ovakav jednozrni beton ima zapreminska težinu približno  $2/3$  zapreminske težine teškog betona. To su relativno najteži laci betoni. Čvrstoća im se kreće od  $40$  do  $80 \text{ kp/cm}^2$ . Modul elastičnosti nije veći od  $80\,000\text{--}110\,000 \text{ kp/cm}^2$ . Koefficijent toplotne provodljivosti iznosi oko  $0,4$  do  $0,5 \text{ kcal/m h }^{\circ}\text{C}$ . Ukucavanje eksera u jednozrni beton je unekoliko otežano. Sveži jednozrni beton ne podleže segregaciji.

**Betoni sa lakiem agregatima.** Razlikuju se laci agregati neorganskog i organskog porekla.

Kao laci *neorganski agregati* upotrebljavaju se agregati od laki stene, kao što je kamen sedra, zatim plovučac (Bims); od ovog materijala izrađuju se kako nearmirani tako i armirani betoni. Svi betoni sa ovim agregatom zahtevaju, zbog velike poroznosti agregata, uvećanu količinu vode za spravljanje. Beton od *kotlovske zgure* (šljakobeton) upotrebljava se mnogo za monolitne izradevine, ali i u industrijskoj proizvodnji zidnih blokova i drugih elemenata. Dolazi u obzir samo šljaka koja ne sadrži sumpornih jedinjenja, sulfata i sulfida (ne preporučuje se veća količina od  $\sim 1\%$  sulfata i  $0,2\%$  sulfida). Štetno dejstvo sumpornih jedinjenja, međutim, dolazi do izražaja samo u prisustvu vode ( $\text{H}_2\text{O} + \text{SO}_3 = \text{H}_2\text{SO}_4$ ); sumporna kiselina izaziva zapreminsku nestalnost koja može dovesti do građevinskih katastrofa. U zguri ne sme biti živog

kreča, a ni više od 15% nesagorele materije, koja stvara levkasta klobučenja i rascvetavanja na površini. Zbog opasnosti od korozije ovaj beton nije podesan za armirane konstrukcije. Preporučuje se zgura koja je na kiši ili mrazu odležala izvesno vreme; ponекад se i zamjenjuje fina frakcija 0/1 peskom ili kamenim brašnom. Normalni šljakobeton ima zapreminska težina od 1200 do 1800 kg/m<sup>3</sup>; čvrstoća na pritisak kreće se od 20 do 70 kp/cm<sup>2</sup>. Koeficijent toplotne provodljivosti iznosi oko 0,6 kcal/m h °C.

**Beton od opekarske sitneži** može da spada u laki, ali i u teške betone, jer mu se zapreminska težina kreće od 1000 do 2000 kg/m<sup>3</sup>, što zavisi od zapreminske težine agregata i od načina izrade. Ovaj beton priprema se kako sa kontinualnim granulometrijskim sastavom tako i na način koji odgovara spravljanju jednozrnog betona. Agregat se dobija mašinskim drobljenjem i prosejavanjem opekarskih otpadaka; umesto sitnih frakcija upotrebljava se takode i prirodi pesak. Čvrstoća ovog betona kreće se unutar vrlo širokih granica. Betoni zapreminske težine oko 1800 kg/m<sup>3</sup> imaju čvrstoću 20...160 kp/cm<sup>2</sup>, ali teži betoni mogu dostići čvrstoću dobrog, normalnog betona. Laki betoni od opekarske sitneži imaju koeficijent toplotne provodljivosti  $\lambda = 0,25\text{--}0,52 \text{ kcal/m h } ^\circ\text{C}$ .

U novije vreme proizvode se sve više naročiti laki agregati od *naduvene (ekspandirane) gline* ili od *naduvene (penaste) zgure*. Naduvena gлина dobija se zagrevanjem nekih vrsta masnine gline na temperaturi preko 1000°C; pri tom materijal naglo nabrekne, a posle hlađenja i raspadanja u zrncu zadržava vrlo poroznu strukturu. Materijal je odličan sa gledišta toplotne izolacione moći, vrlo lako se ugrađuje, a može se upotrebiti i za armirani beton. Zapreminska težina ovog agregata kreće se od 300 do 600 kg/m<sup>3</sup>. Naduvena (penasta) zgura dobija se time da se užarena topionička zgura naglo hlađi ograničenom količinom vode; ovim postupkom dobiju se frakcije razne krupnoće, sve do  $\varnothing 12 \text{ mm}$ . Topionička zgura treba da zadovoljava sa gledišta primesa i sadržine sulfata.

Betoni sa *organiskim agregatom* imaju karakteristike vrlo lakih betona; oni samo izuzetno dolaze u obzir za konstrukcije koje nose. Primjenjuje se drvo u raznim vidovima (strugotina, talašika i drvna vuna), ali i neki drugi materijali organskog porekla, kao pozder, razna biljna vlakna, pluto, pa i slama. Ovi agregati mogu se prethodno, ili u toku spravljanja betona, mineralizirati radi obezbeđenja od truljenja i nadimanja.

*Drvna strugotina* upotrebljava se najviše za izradu toplih podovala bez razdelnika, poznatih pod imenom *ksilolit*. Ovo je u stvari laki beton koji se spravlja od amorfognog magnezita izmešanog sa magnezijevim hloridom ( $MgCl_2$ ) odredene koncentracije (25 do 28 Bé) i sa drvnom strugotinom kao agregatom; smeši se obično dodaje i postojana crvena boja. Ovo magnezisko vezivno sredstvo (Sorelov cement) vrlo brzo stvrdnjava i sa biošloškog gledišta u potpunosti stabilizuje drvne otpatke. Ne sme se primeniti onde gde je u kontaktu sa železom, koje napada i razara u kratkom roku. Ovi laki betoni nisu postojani u vodi i vlazi.

*Talašika i drugi stolarski otpaci* razne krupnoće upotrebljavaju se za izradu lakog drvnog betona poznatog pod imenom *Durisol*; materijal je najpre patentiran u Švajcarskoj, ali se izrađuje i kod nas, kao i u raznim drugim zemljama. Fabrikuju se izolacione ploče raznih debljina i deblji zidni elementi, koji se pri fabrikaciji presuju i postižu znatniju moć nošenja.

*Drvna vuna* se vrlo mnogo upotrebljava za izradu lakih ploča koje se često, prema prvom poznatom fabričkom imenu, nazivaju *Heraklit-pločama*. U nas se proizvode pod raznim fabričkim imenima; to su npr. *Tarolit* i *Drvolit* ploče i druge. Drvna vuna, koja se za ovu svrhu specijalno priprema, daje materijalu karakter jednozrnog betona sa lakinm agregatom. Rade se bilo od magneziskog vezivnog sredstva ili, što se danas češće praktikuje, od portlandcementa; u potonjem slučaju materijal se stabilizuje ekstrakcijom sokova i druge nepostojane materije kuvanjem, potapanjem u cementnom ili krečnom mleku, ili u rastvoru vodenog stakla i drugih hemijskih jedinjenja; to su postupci koje producenti obično drže u tajnosti. Te se ploče najčešće upotrebljavaju za izradu pregrada, ali dolaze u obzir i za mnoge druge termoizolacione potrebe; čvrstoća im je mala, pa i neznačna, te za konstrukcije iole znatnije nosivosti načelno ne dolaze u obzir. Proizvode se presovanjem u kalupima. Zapreminska težina im se kreće od 350 do 550 kg/m<sup>3</sup>. Koeficijent toplotne provodljivosti

je vrlo nizak; silazi do ispod 0,1 kcal/m h °C. Na tržištu se najčešće susreću ploče debljine 1,5 do 10 cm, širine oko 50 cm a dužine 2 m, pa i više. Izrađuju se i drugi izolacioni i montažni elementi za zidove i tavanice. Ponekad se kombinuju i sa drugim materijalima: ksilolitom, furnirima i dr. Mogu se po volji rezati i seći; pričvršćuju se ekserima.

**Celiasti betoni** dobijaju poroznu strukturu postupcima kojima je cilj da u svežem materijalu izazovu hemijske reakcije usled kojih materijal postaje znatno porozan. Između njih su najpoznatiji *gas-betoni* i *peno-betoni*.

**Gas-betoni** se stvaraju posredstvom nekog agensa, vrlo često fino mlevenog aluminijskog praha, koji izmešan sa cementom stvara mehurove vodonika; materijal se pri tom nadima a posle očvršćavanja zadržava celiastu strukturu. Umesto aluminijskog praha primenjuju se i druga sredstva: vodonični superoksid i druga jedinjenja razvijaju kiseonik, a kalcijev karbid stvara plin acetilen. Gas-betoni spravljaju se od smeše portlandcementa i finih agregata sa vodom, a takođe i od čiste cementne kaše. Izrađuju se najčešće industrijskim putem, ali takođe i neposrednim izlivanjem na gradilištu. Mnogi postupci su poznati pod imenima zaštićenim patentima kao što su: *Aerokret*, *Siporex* i mnogi drugi.

**Peno-betoni** nastaju tako da se preparati koji razvijaju penu mešaju sa vodom za spravljanje betona; to su obično proteini, smolin sapuni i derivati naftalensulfonske kiseline. Ova pena je sličnog karaktera kao ona koju razvijaju preparati namenjeni suzbijanju požara. Tim putem se u svežem betonu stvaraju vazdušni mehurići koji su pri očvršćavanju betona uzročnici poroznosti. Peno-betoni su nešto gušći i teži od gas-betona.

Toplotna provodljivost obe vrste ovih lakih betona vrlo je povoljna, ali zavisi od gustine materijala. Među celiastim betonima ima betona izvesne moći nošenja, pa i većih čvrstoća na pritisak, do  $\sim 100 \text{ kp/cm}^2$ ; normalno se ne zahteva čvrstoća veća od  $30 \text{ kp/cm}^2$ . Zbog velikog skupljanja ne mogu se preporučiti za monolitne gradevine, ali se mnogo proizvode u vidu ploča i drugih tankih elemenata. Mogu se seći i pilom obradivati kao drvo, mogu se u njih ukucavati i ekseri, mogu se bušiti svrdlom itd.

Betoni ove vrste ne smeju se ni u kom slučaju zameniti sa ranije spomenutim betonima sa uvučenim vazduhom, koji spadaju u kategoriju teških betona.

#### BETONSKI INDUSTRIJSKI PROIZVODI

Ovi proizvodi imaju dužu tradiciju, ali poslednjih godina uzimaju sve više maha zahvaljujući težnji za sve većom industrializacijom gradevinarstva, intenzivnjem montažnom građenju i nastojanju da se, u interesu ubrzanja građenja i pročišćenja gradevinske sezone, sve više elemenata proizvede industrijskim putem, a da se na gradilištu obavlja samo njihovo ugrađivanje. Pored nekih već tradicionalnih zanatskih i industrijskih produkata od betona kao što su betonske cevi, tavančne grede, podne pločice i dr., danas se proizvode u velikom obimu: betonski blokovi za zidanje, razne zidne i izolacione ploče, ploče za podove i trotoare, ploče za pokrivanje krovova, razni armiranobetonski elementi za međuspratne konstrukcije, natprozornici, nadvratnici, stepenice, armiranobetonski prozori i slični elementi, stubovi za električne vodove i za druge potrebe, dimnjačka vratanca, jevtiniji uredaji za sanitarnе potrebe itd.

Ovi proizvodi izrađuju se kako od normalnog (teškog) tako i od lakog betona; veliki napredak u tehnologiji lakog betona omogućio je u znatnoj meri afirmisanje industrijskog betona za potrebe stambene izgradnje. Mnogi gradevinski elementi kako od normalnog tako i od lakog betona izrađuju se kao armirane, pa i kao prednapregnute konstrukcije.

Sem klasičnih i gradilišnih načina ugradivanja, u industriji betonskih proizvoda primenjuju se i izvesni specijalni postupci kako bi se, pored pojednostavljenja tehnološkog procesa, postiglo i što brže očvršćavanje svežeg betona. Neki postupci, kao npr. već spomenuta izrada vakuum-betona, sami po sebi predstavljaju ubrzani način proizvodnje betona. Za okrugle cevi, stubove za električne vodove i za razne druge potrebe primenjuje se postupak izrade *centrifugiranog betona*, koji se sastoji u brzom okretanju metalne cevne oplate, prethodno napunjene betonom; pri tom se betonska masa zbijja, krupnije čestice gravitiraju ka spoljnoj površini, dok se sitnija zrna kreću ka unutarnjoj strani, gde obrazuju glatki i tanki sloj maltera.

Između postupaka koji se u savremenoj tehnologiji primenjuju radi bržeg vezivanja i očvršćavanja betona spomenute se ovde neki koji daju najbolje rezultate. Brzina vezivanja cementa, koja se za gradilišne potrebe mora veštacki smanjivati, pri industrijskoj proizvodnji veštacki se povećava. To se celishtodno može postići dodatkom  $\text{CaCl}_2$  u količini od 2% (od količine cementa), čime se vreme početka vezivanja smanjuje približno na polovinu; većim dodavanjem  $\text{CaCl}_2$  ubrzava se početak vezivanja još i više. Dodavanje kalcijeva hlorida svežem betonu može imati i druga preimljstva, o kojima je bilo reči. Brže očvršćavanje betona posle sprovedenog vezivanja cementa postiže se dejstvom topote, bilo pri normalnom atmosferskom pritisku bilo pri *zparivanju* pod uvećanim pritiskom. Pri normalnom atmosferskom pritisku beton se 8 časova zagreva do  $\sim 80^\circ\text{C}$  u ambijentu u koji se pušta vodena para sve do punog zasićivanja; ovi betoni imaju posle 8 časova čvrstoču ravnu približno 60...65% standardne čvrstoće 28 dana posle spravljanja na uobičajeni način. Zparivanjem u autoklavima pod pritiskom od 8...12 atmosfere postiže se već posle 2 časa vrlo visoke čvrstoće. Prema Brocardu postignute su ovim načinom izrade sa smešom od kvarcitnog agregata, 400 kg super-cementita i 160 kg silicijskog praha, sa vodocementnim faktorom 0,40, a pod pritiskom od 10 atm, sledeće čvrstoće na pritisak: posle 2 časa 780 kp/cm<sup>2</sup>, posle 4 časa 1010 kp/cm<sup>2</sup>, a posle 8 časova dobijen je rekordni podatak od 1240 kp/cm<sup>2</sup>. Skupljanje ovog betona bilo je znatno slabije od betona koji je pripremljen bez zparivanja; niži je bio i njegov koeficijent topotnog istezanja.

Između betonskih industrijskih proizvoda koji se kod nas fabrikuju u većem obimu spominjemo niže navedene.

**Betonki zidni i tavanični blokovi** savremenog tipa od betona sa lakisim agregatima, naročito od kotlovske ili lake topioničke zgure, proizvode se i primenjuju kod nas sve više, te ovi elementi u našem građevinarstvu postepeno zamjenjuju klasične materijale, zidnu opuku i dr. Oni se rade raznih oblika i dimenzija. Na sl. 24 prikazana su tri tipa tzv. šljakobetonskih blokova, proizvod „Standardbetona“ u Beogradu. Pod *a* je predstavljen normalni blok za nosive zidove, pod *b* blok za ispunu skeletnih i drugih nosivih konstrukcija, a pod *c* blok za tavanične (međuspratne) konstrukcije. U radioničkoj izradi proizvode se i blokovi drugih dimenzija sa raznim šupljim otvorima, npr. blokovi  $25 \times 50 \times 22$  cm ili  $25 \times 25 \times 22$  cm.

Laki betoni u svim ranije navedenim oblicima proizvode se naročito mnogo u vidu ploča za zidove montažnog i polumontažnog karaktera, za pregradne zidove, izolacione obloge, tavanične elemente i dr. Ploče sa agregatom od drvene vune proizvode se pod raznim fabričkim imenima u debljinama od 1,5 do 10 cm, dužine 200 cm a širine 50 cm.

**Betonske ploče i pločice** (nazvane i »cementne pločice«) izrađuju se od 2 sloja, donjeg sa grubljim i gornjeg sa finijim agregatom. Obično se površinskom sloju dodaju postojane boje i time stvaraju raznoliko obojene površine. Prave se u raznim dimenzijama, često  $20 \times 20$  cm, debljine oko 2 cm. Izrađuju se presovanjem u metalnim kalupima. Specijalnu vrstu ovih ploča čine ploče od *teraca*. Teraco je fini beton od portlandcementa ili belog cementa i raznobojnog otpornog kamenog agregata. Proizvodi se ne samo industrijskim putem u vidu gornjeg sloja ploča do  $50 \times 50$  cm, već i neposrednim livenjem većih površina na licu mesta; ovim putem se često izrađuju i tzv. hladni podovi hodnika, ste-

peništa, kupatila i drugih sporednih prostorija. Teraco se normalno nanosi na podlogu od običnog betona, a posle očvršćavanja se ručno ili mašinski brusi, natapa uljem i polira.

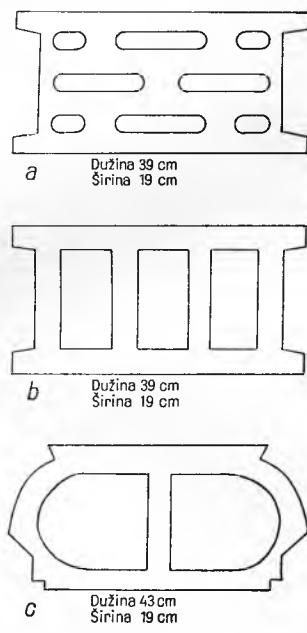
**Montažni elementi** izrađuju se u bogatom assortimanu kako od teškog tako i od lakog betona. Ova materija, kao i razni drugi proizvodi: elementi međuspratnih konstrukcija (tavanica), kanalizacijske cevi itd., obradeni su sa odgovarajućeg aspekta u drugim jedinicama ove enciklopedije.

Mnogo su cjenjeni proizvodi od betona sa *azbest-cementnim vlaknima*. Poznati su u svetu često pod fabričkim imenom »Eternit«, a kod nas pod imenom »Salonit«, prema oznaci prve tvornice koja ih je u našoj zemlji proizvodila (v. *Azbest-cementni proizvodi*).

Industrija betonskih proizvoda raznih vrsta i tipova treba da godine 1965 proizvodi, između ostalog, 5 300 000 m<sup>2</sup> lakih ploča i 360 000 m<sup>3</sup> lako betona druge primene, zatim 300 000 000 komada blokova za zidove, 400 000 m<sup>2</sup> teracopločica, 1 900 000 tona montažnih elemenata za visoke i niske građevine. Time bi godišnja proizvodnja betonskih fabrikata postigla 1965 količinu od  $\sim 0,087$  tona po jednom stanovniku naše zemlje.

LIT.: Privremeni tehnički propisi za beton i armirani beton sa Uputstvom za njihovu primenu, Beograd 1947. — *Ministarstvo građevina FNRJ*, Beton, Beograd 1948. — L. Bendel, Betonrichtlinien, Zürich, 1948. — A. Kleinlogel, Einflüsse auf Beton, Berlin 1950. — A. Pavlović, Osnovi tehnologije betona, Beograd 1953. — K. Klochner i K. Hruban, Železový beton, Praha 1953. — L'Hermitie, Idées actuelles sur la technologie du béton, Paris 1955. — M. Roš, Zemente für große Talsperren, Zürich 1956. — J. W. Kelley i J. C. S. Staff, Izrada nepromocičivog betona (prevod), Beograd 1958. — K. Hruban, Betonové konstrukce, Praha 1959. — Инструкция по применению бетона с добавками солей твердеющего на морозе, Москва 1959. — Инструкция по автоклавной обработке изделий из бетона на плотных и пористых заполнителях, Москва 1959. — W. Grün, Beton-Zusätze, Düsseldorf 1959. — S. Bechyně, Technologie betonu I-V, Praha 1959/1961.

J. Hahamović



Sl. 24. »Šljakabetonski« blokovi

**BETONSKE KONSTRUKCIJE, neojačane**, građevinske konstrukcije od betona (v. *Beton*). Svežom plastičnom masom ovog veštackog kamena popunjavaju se pripremljene oplate, kalupi, temeljne lame, iskopi i sl. zavisno od namene konstruktivnog elementa. To mogu biti npr. podzemni ili nadzemni delovi građevina, montažni građevinski elementi i dr. Docnjim očvršćavanjem i stvrdnjavanjem betona dobivaju se — posle odstranjenja oplate, kalupa itd. i posle eventualne površinske obrade — gotovi betonski elementi, konstrukcije, pa i celi objekti.

Da bi se betonu popravila izvesna njegova slabija svojstva, on se vrlo često upotrebljava u kombinaciji sa drugim materijalima, naročito sa čelikom ili s azbestnim vlaknima, a sve više se podvrgava prethodnom naprezanju. Tako se dobivaju tzv. *ojačani betoni*. U ovom su članku obradene samo konstrukcije od *neojačanog betona*. Konstrukcije od ojačanog betona obradene su u ovoj enciklopediji pod drugim naslovima (v. *Armiranobetonske konstrukcije, Azbestno-cementni proizvodi, Prednarpregnuti beton*).

Razvoj betonskih konstrukcija uglavnom je u tesnoj vezi sa razvojem produkcije cementa. Prema tome može se istorija betonskih konstrukcija podijeliti u dva razdoblja: prvo, u kojem se umesto cementa u današnjem smislu, tj. hidrauličkog (u vodi nerastvorljivog) vezivnog sredstva, upotrebljavaju kred sa nekim dodacima, zatim čisti kreč ili pak prirodnji cement sa izvenskim hidrauličkim sposobnostima; u drugom razdoblju uglavnom se upotrebljava veštacki hidraulički cement. Prvo razdoblje obuhvata vreme od ran prošlosti do početka XIX st. naše ere; drugo razdoblje predstavlja razvoj modernog rada sa betonom.

Još u prvom razdoblju betona sagradeno je mnogo značajnih građevina, od kojih se veći broj sačuvao do danas. Takav se beton upotrebljava u Egiptu već oko  $\sim 3600$ , npr. za gradnju Labirinta i Nimesove piramide. Iz  $\sim 800$  poznate su betonske konstrukcije u gradu Argistihiili (sadашnji Armavir u SSSR). Na građevinama u Babiloniji pronađeni su delovi izrađeni kao beton, tj. povezivanjem pojedinih manjih kamenih sa cementirajućim vezivom. Jedan od najvećih objekata za koji se delimično upotrebljava beton predstavlja veliki Kineski zid iz  $\sim$  III st. Iz prvog razdoblja betona mogu se spomenuti grčke i kartaginske konstrukcije od betonskog materijala, npr. akvedukt u Argosu.

Betonske su konstrukcije više primenjivali Rimljani koji su dodavali kreču neki pučolanski materijal, te su time dobivali vezivo otporno prema vodi. Ovu materiju nazivali su *caementum*, a građevinski materijal dobiven povezivanjem kamenih zrna sa ovim vezivom *betunium*. Rimljani su betunijem upotrebljavali za najrazličitije građevine; tako su za gradnju pristaništa u mestu Putoloi (Pozzuoli) kod Napulja upotrebljavali betunske blokove. Od tog su materijala gradili mostove (npr. Kaligulin most) i zgrade (npr. Panteon u Rimu, sa kupolom promera 42,7 m, delimično od betunijuma). Upotreba betunijuma za hidrotehničke, saobraćajne i stambene objekte proširila se pod uticajem Rimljana u sve krajeve njihove imperije, osobito u današnju Francusku, Španiju, a i u naše krajeve.

Pose propasti Rimske imperije građevinarstvo je u svim područjima bivše države privremeno palo na niži nivo. U docnjim epochama upotreba betunijuma je uglavnom zaboravljena, a od rimskih iskustava zadržala su se u upotrebi prvenstveno ona koja su se odnosila na konstrukcije od kamena, opeke i drveta. Od materijala izrađenih u vidu betona upotrebljavaju se samo betoni sa vezivom od kreča, gline ili gipsa; sva ova veziva su neotporna ili malo otporna u vodi.

Nova doba u razvoju betonskih konstrukcija nastaje tek sa izumom pravnih hidrauličkih cemenata. Već krajem XVIII st. pronašao je Englez Parker *roman-cement*, otporan protiv vode, što je tada ostalo bez većih praktičnih rezultata. Za dalji napredak važne su studije Francuzu Vicata, početkom XIX st., koje su omogućile industrijsku produciju cementa otpornog u vodi. Nešto kasnije