

# Lagani betoni

---

**Rakitić, Martina**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:974432>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-14**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,  
University of Zagreb](#)





SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Martina Rakitić

# **LAGANI BETON**

Kolegij: Osnove tehnologije betona

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Marija Jelčić Rukavina

Zagreb, 2023



UNIVERSITY OF ZAGREB  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Martina Rakitić

# **LIGHTWEIGHT CONCRETE**

Course: Basics of Concrete Technology

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Marija Jelčić Rukavina

Zagreb, 2023

## IZJAVA

Završni rad izradila sam samostalno, koristeći stečena znanja tijekom studija i dolje navedenu literaturu, u suradnji s mentoricom izv. prof. dr. sc. Marijom Jelčić Rukavina i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva.

Zagreb, 2023.

Martina Rakitić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GRAĐEVINSKI FAKULTET

OBRAZAC 2

## TEMA ZAVRŠNOG ISPITA

Ime i prezime studenta: **Martina Rakitić**

JMBAG: **0035225200**

Završni ispit iz predmeta: **Osnove tehnologije betona**

Naslov teme  
završnog ispita:

|     |                             |
|-----|-----------------------------|
| HR  | <b>Lagani betoni</b>        |
| ENG | <b>Lightweight concrete</b> |

Opis teme završnog ispita:

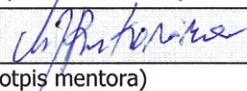
U radu je potrebno, temeljem analize dostupne literature, opisati:

- 1/ lagane betone u odnosu na obični beton
- 2/ podjelu laganih betona u ovisnosti o namjeni te vrsti proizvodnje
- 3/ svojstva laganih betona na sobnim i visokim, požarnim temperaturama
- 4/ konkretne primjene laganih betona te
- 5/ mogućnosti smanjenja ugljičnog otiska u proizvodnji laganih betona.

Datum: **6. travanj 2023. godine**

Komentor: **-**  
(Ime i prezime komentora)

Mentor: **izv.prof. Marija Jelčić Rukavina**  
(Ime i prezime mentora)

  
(Potpis mentora)

## Sažetak:

Lagani beton posebna je vrsta betona čija je volumenska masa smanjena u odnosu na obične betone. To smanjenje postiže se upotrebom laganog agregata porozne strukture koji doprinosi i dobroj toplinskoj vodljivosti, pa su lagani betoni dobri izolatori topline i zvuka.

U radu je, temeljem dostupne literature, najprije obrađena povijest laganih betona, a zatim agregati koji se koriste za njihovu proizvodnju. Dana je podjela laganih betona prema namjeni te načinu proizvodnje. Opisana su mehanička i trajnosna svojstva te opisane konkretne primjene u visokogradnji, kod izrade mostova te za izradu specijalnih konstrukcija. Na kraju su dane mogućnosti uporabe prirodnih materijala za proizvodnju laganih betona kako bi se smanjio ekološki otisak.

Ključne riječi: lagani beton, lagani agregat, perlit, vermikulit, ekspandirana glina, mehanička i trajnosna svojstva

## Abstract:

Lightweight concrete is a special type of concrete whose volumetric mass is reduced compared to conventional concrete. This reduction is achieved by using lightweight aggregates with porous structure, which also contributes to good thermal conductivity of the final material. Therefore, lightweight concretes have good thermal and sound properties.

The work, in accordance to available literature, first describes the history of lightweight concrete, and then the aggregates used for their production. Then their classification according to intended use and production method is described. The mechanical and durability properties are listed, and specific applications in building construction, bridge building and the manufacture of special structures are described. Finally, the possibilities of using natural materials for the production of lightweight concrete are highlighted in order to reduce environmental footprint.

Key words: lightweight concrete, lightweight aggregate, perlite, vermiculite, expanded clay, mechanical and durability properties

Sadržaj:

|           |   |  |
|-----------|---|--|
| <b>1</b>  | <b>UVOD .....</b>   | <b>2</b>   |
| <b>2</b>  | <b>POVIJEST LAGANIH BETONA.....</b>                       | <b>3</b>   |
| <b>3</b>  | <b>KOMPONENTE SASTAVA BETONA .....</b>                    | <b>5</b>   |
| 3.1       | Agregat .....   | 5  |
| 3.2       | Cement.....   | 10   |
| 3.3       | Voda i dodatci betonu.....                                | 11   |
| <b>4</b>  | <b>PODJELA LAGANIH BETONA PREMA TEHNOLOGIJI .....</b>     | <b>12</b>  |
| 4.1       | Lakoagregatni betoni .....                                | 13   |
| 4.2       | Ćelijasti betoni.....                                     | <b>Pogreška! Knjižna oznaka nije definirana.</b> |
| 4.2.1     | Plinobetoni.....  | 14   |
| 4.2.2     | Pjenobetoni .....   | 15   |
| 4.2.3     | Lagani beton od ekspaniranog polistirena .....            | 16   |
| 4.3       | Lagani betoni od jednakozrnatog agregata.....             | 17   |
| <b>5</b>  | <b>MEHANIČKA I TRAJNOSNA SVOJSTVA LAGANOG BETONA.....</b> | <b>18</b>  |
| 5.1       | Mehanička svojstva .....                                  | 18   |
| 5.2       | Trajnosna svojstva .....                                  | 21   |
| 5.2.1     | Kemijska postojanost.....                                 | 21   |
| 5.2.2     | Požarna otpornost .....                                   | 26   |
| 5.2.3     | Otpornost na smrzavanje i odmrzavanje .....               | 28   |
| <b>6</b>  | <b>PROIZVODNJA LAGANIH BETONA.....</b>                    | <b>29</b>  |
| <b>7</b>  | <b>PRIMJENA LAGANIH BETONA .....</b>                      | <b>32</b>  |
| 7.1       | Primjena laganih betona u visokogradnji .....             | 32   |
| 7.2       | Primjena laganih betona kod mostova.....                  | 36   |
| 7.3       | Primjena laganih betona za specijalne konstrukcije .....  | 37   |
| <b>8</b>  | <b>LAGANI BETON PROIZVEDEN OD BIOMATERIJALA .....</b>     | <b>40</b>  |
| <b>9</b>  | <b>ZAKLJUČAK.....</b>                                     | <b>46</b>  |
| <b>10</b> | <b>LITERATURA .....</b>                                   | <b>47</b>  |



**Popis slika:**

|   |    |
|---|----|
| Slika 1 Plovućac [4].....   | 3  |
| Slika 2 Zgura [5] .....   | 3  |
| Slika 3 Volumenska masa različitih vrsta laganog agregata [1] .....                                       | 5  |
| Slika 4 Perlit [9].....   | 6  |
| Slika 5 Ekspandirani vermikulit [10] .....  | 7  |
| Slika 6 Ekspandirana glina [8] .....  | 7  |
| Slika 7 Agregat od letećeg pepela [12].....   | 8  |
| Slika 8 Ekspandirana zgura [13].....  | 8  |
| Slika 9 Vrste i volumenske mase laganih betona ovisno o vrsti proizvodnje [1].....                        | 12 |
| Slika 10 Odnos tlačne čvrstoće i volumenske mase raznih laganih betona [1,7].....                         | 12 |
| Slika 11 Presjek lakoagregatnog betona od ekspandirane gline [8] .....                                    | 13 |
| Slika 12 Presjek plinobetona [8].....   | 14 |
| Slika 13 Mikrostruktura laganog betona od EPS-a [8].....  | 16 |
| Slika 14 Lagani beton od jednakoznatog agregata [8] .....   | 17 |
| Slika 15 Postotni gubitak težine betona pri djelovanju 15% klorovodične kiseline nakon 3 mjeseca [3]..... | 23 |
| Slika 16 Postotni gubitak težine betona pri djelovanju 5% sumporne kiseline nakon 6 tjedana [3] .....     | 23 |
| Slika 17 Postotni gubitak težine betona pri djelovanju 5% mliječne kiseline nakon 3 mjeseca [3] .....     | 24 |
| Slika 18 Ispitivanje dubine karbonatizacije fenolftaleinom [1] .....                                      | 25 |
| Slika 19 Kompozitna ploča s profiliranim metalnim podom [20].....   | 34 |
| Slika 20 Predgotovljeni zidni element od laganog betona [8].....  | 35 |
| Slika 21 Most Andrej Sacharov [21] .....  | 36 |
| Slika 22 Poprečni presjeci mosta Andrej Sacharov[11] .....  | 37 |
| Slika 23 Naftna platforma [8].....  | 38 |
| Slika 24 Shematski prikaz platforme za skijaške skokove Oberstdorfu [11].....                             | 39 |

|  |    |
|--|----|
| Slika 25 Poprečni presjek južne tribine stadiona Rugby Football Union Grounda u Twickenhamu [11].....            | 39 |
| Slika 26 Grane konoplje [23] .....   | 40 |
| Slika 27 Dobivene tlačne čvrstoće nakon 28 dana [23].....  | 41 |
| Slika 28 Vlakna miskantusa veličine 0-2 mm (lijevo) i veličine 2-4 mm (desno) korištena u istraživanju [24]..... | 42 |
| Slika 29 Volumenske mase betonskih mješavina M10, M20 i M30 korištenih u istraživanju [24] .....                 | 43 |
| Slika 30 Tlačne čvrstoće betonskih mješavina M10, M20 i M30 korištenih u istraživanju [24] .....                 | 43 |
| Slika 31 Apsorpcija zvuka betonskih mješavina M10, M20 i M30 korištenih u istraživanju [24] .....                | 44 |
| Slika 32 Veličine čestice agregata: A(konoplje), B(kukuruz), C(suncokret) [25] .....                             | 44 |

Popis tablica:

|  |    |
|--|----|
| Tablica 1 Volumenska masa i vodoupojnost laganih agregata, tlačne čvrstoće betona ovisno o vrsti laganog agregata [1,3,11] ..... | 9  |
| Tablica 2 Svojstva autoklaviranog betona [8] .....   | 15 |
| Tablica 3 Tipični sastavi pjenobetona [8].....   | 15 |
| Tablica 4 Tipični svojstva pjenobetona [58].....   | 16 |
| Tablica 5 Razredi tlačne čvrstoće laganih betona [7].....  | 19 |
| Tablica 6 Podjela laganih betona prema namjeni [1,11] .....  | 20 |
| Tablica 7 Sastav betona, volumenska masa i tlačna čvrstoća [3].....  | 22 |
| Tablica 8 Preostale tlačne čvrstoće laganih i običnog betona nakon izlaganja visokim temperaturama [ $\text{N/mm}^2$ ] [3] ..... | 27 |
| Tablica 9 Primjer sastava laganih betona .....   | 31 |
| Tablica 10 Lagani beton za zidove [22] .....   | 33 |
| Tablica 11 Lagani beton za stropne ploče [22].....   | 33 |
| Tablica 12 Lagani beton u korporativnom centru Nationsbank [22].....   | 34 |

## 1 UVOD

Svjetska potrošnja betona, materijala koji ima najrašireniju primjenu u građevinarstvu, godišnje iznosi 1,5 do 3 tone po stanovniku u razvijenim područjima.[1] Komponente betona su agregat, cement i voda, a često se u svrhu poboljšanja svojstava svježeg ili očvrstnalog betona upotrebljavaju kemijski i mineralni dodatci. Niska cijena sastojaka i njihova dostupnost, niska cijena ugradnje i održavanja, velika krutost i trajnost, jednostavnost oblikovanja elemenata, požarna otpornost, ušteda energije i održivost neki su od razloga široke primjene betona.[1] Ograničenja u primjeni betona javljaju se zbog njegove niske vlačne čvrstoće, male žilavosti i potrebe za njegovom nakon ugradnje. Iako beton ima puno nedostataka, pravilnim projektiranjem betona, odnosno granulometrijskog sastava agregata, količine cementa i vode te upotrebom dodataka i pravilnom tehnologijom izvedbe, njegove mane mogu biti svedene na minimum. Uslijed sve većih zahtjeva trajnosti i projektiranja složenijih konstrukcija, tijekom vremena je počeo razvoj posebnih betona koji se koriste pri betoniranju u ekstremnim klimatskim uvjetima, kod betoniranja visokih građevina, kod potreba za većom tlačnom čvrstoćom, modulom elastičnosti ili boljih izolacijskih svojstava. Lagani beton dio je te grupe posebnih betona koji nastaju modifikacijom svojstava običnog betona uz primjenu novih tehnologija ili dodatnih komponenata sastava betona.[2] Prilagodba svojstava posebnih betona može rezultirati izvedbom kompozita koji mogu zamijeniti tradicionalne materijale u građevinarstvu kao što su drvo, keramika i metali.[2]

U ovom radu, koji je podijeljen na 9 poglavlja, obrađivat će se sve bitne karakteristike laganog betona. Nakon uvoda u rad, u drugom poglavlju dana je kratka povijest proizvodnje laganog betona. Treće poglavlje opisuje komponente, odnosno agregat, cement, vodu i dodatke koji beton čine laganim. Podjela laganih betona prema tehnologiji definirana je u četvrtom poglavlju, a mehanička i trajnosna svojstva laganih betona definirana su u petom. Šesto i sedmo poglavlje obuhvaćaju proizvodnju i primjenu laganih betona u različitim područjima građevinarstva. U osmom poglavlju obrađeni su biomaterijali koji mogu doprinijeti smanjenju učinka na okoliš, a u posljednjem poglavlju dani su zaključci do kojih se došlo pri pisanju ovog rada.

## 2 POVIJEST LAGANIH BETONA

Lagani beton koristi se još od antičkih vremena te se za njegovu proizvodnju upotrebljavao prirodni agregat vulkanskog podrijetla, kao što je plovućac ili zgura koji su prikazani na slikama 1 i 2. Sumerani su ga primjenjivali za izgradnju Babilona, a u Europi su Grci i Rimljani koristili lagani beton za izgradnju Aje Sofije, Panteona, akvedukta Pont du Gard i Koloseuma u Rimu.[3]



Slika 1 Plovućac [4]



Slika 2 Zgura [5]

Nakon sloma Rimskog Carstva upotreba laganog betona opada zbog nedostupnosti agregata vulkanskog podrijetla. 19. i 20. stoljeće označavaju značajan period za tehnologiju laganog betona. U Prvom svjetskom ratu, u Sjedinjenim Američkim Državama proizvedeno je 14 laganih betonskih brodova, a zbog dobrih trajnosnih svojstava takvih brodova, u Drugom svjetskom ratu proizvedeno ih je 104.[6] Osim prirodnog agregata vulkanskog podrijetla u nekim područjima, kao što su Malezija, Indonezija i Nigerija, koristile su se ljuske palminog ulja kao agregat radi smanjenja otpada koji se dobiva proizvodnjom palminog ulja u industrijama.[3] Zbog zahtjeva za većom količinom agregata pristupa se tehnikama proizvodnje umjetnog agregata koji se dobiva u tvornicama toplinskom obradom materijala prirodnog podrijetla (glina, škrljevac) i obradom industrijskih proizvoda kao što su zgura visokih peći i leteći pepeo.[3] Svojstva takvih agregata ovise o prirodnim sirovinama te o procesima proizvodnje.

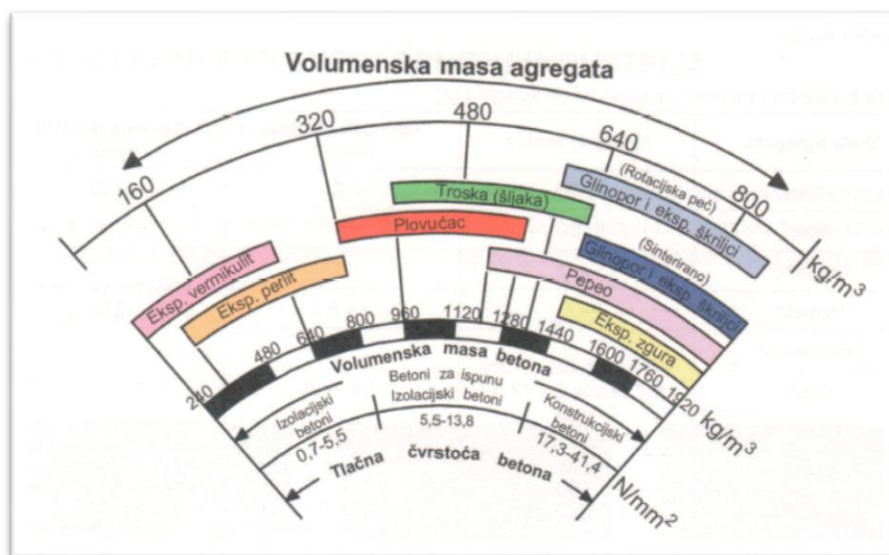
U Ujedinjenom Kraljevstvu, na početku 20. stoljeća, korišten je portlandcementni klinker za izgradnju British Museuma, ali zbog korištenja ulja i različitih goriva za loženje visokih peći njegova primjena se smanjuje i povećava se primjena letećeg pepela.

Usljed potrebe za poboljšanom čvrstoćom laganih betona, u 20. stoljeću je počeo razvoj lakoagregatnih betona visoke čvrstoće, posebno u Norveškoj. Proizvodi se tako da se koristi agregat male čvrstoće sa cementom visoke čvrstoće, a zbog dobivene visoke čvrstoće takvog laganog betona njegova struktura je zbijena što može prouzročiti opadanje izolacijskih svojstava u odnosu na obične lakoagregatne betone, no to se može poboljšati modificiranjem porozne strukture koristeći polimere, dodatke za uvlačenje zraka tzv. aerante ili polimerna vlakna.[3]

### 3 KOMPONENTE SASTAVA BETONA

#### 3.1 Agregat

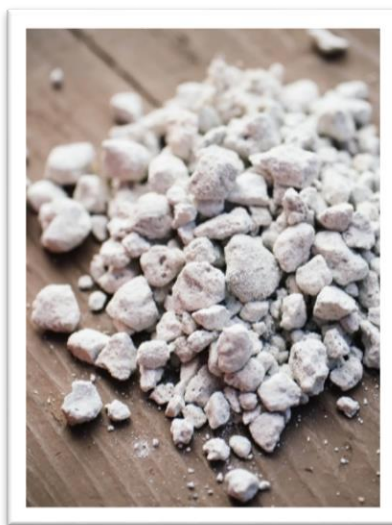
Za proizvodnju laganih betona koristi se agregat volumenske mase manje od  $1200 \text{ kg/m}^3$  (slika 3), pri čemu volumenska masa predstavlja masu materijala podijeljenu s volumenom materijala s porama, a takva mala volumenska masa proizlazi iz visokoporozne i ćelijaste mikrostrukture.[1] Agregat predstavlja oko 70-80% volumena svih komponenata korištenih u betonu pa je njegov utjecaj vrlo bitan za ponašanje betona u svježem i očvrslulom stanju. Maksimalan promjer zrna laganog agregata ograničen je na 25 mm zbog činjenice da najkrupnija zrna agregata povećavaju segregaciju svježeg betona, nehomogenost očvrslulog betona i povećavaju vjerojatnost nastanka mikropukotina na mjestu veze agregata i cementne paste.[1,7] Takav agregat dijeli se na agregat koji je prirodnog podrijetla i spreman je za korištenje odmah neposredno nakon drobljenja ili prosijavanja i na agregat koji se proizvodi toplinskom obradom iz materijala prirodnog podrijetla, industrijskih nusprodukata ili otpada.[3] Svojstva laganog betona ovise o vrsti agregata koji se koristi za njegovu proizvodnju, pa tako ovisno o različitim volumenskim masama agregata mogu se dobiti lagani betoni različite čvrstoće.



Slika 3 Volumenska masa različitih vrsta laganog agregata [1]

Prirodni materijali koji se upotrebljavaju za proizvodnju agregata toplinskim procesima su perlit, vermikulit, glina i škrljevac, a industrijski nusprodukti koji se koriste za proizvodnju takvog agregata su leteći pepeo i zgura visokih peći te će te vrste biti objašnjene u nastavku. Takvi agregati proizvode se procesima širenja (ekspanzije) ili skupljanja.[3] Kod širenja materijal se zagrijava na temperaturu na kojoj se javlja plastičnost materijala zajedno sa stvaranjem plina. Proces skupljanja javlja se kad se materijal topi prilikom čega se njegovi dijelovi spajaju zajedno. Toplinske obrade korištene za proizvodnju sintetičkih agregata najčešće se odvijaju u rotacijskim pećima koje su slične onima za proizvodnju portlandskog cementa.[1,3] U takvim slučajevima sirovina se drobi ili melje na određenu veličinu i izlaže se temperaturama između 1000 i 1100°C te se pri tome dio materijala otopi i prijeđe u viskozno stanje, a nastali plinovi ostaju zarobljeni viskoznom talinom i ekspandiraju sintetiranu masu.[1]

Perlit, prikazan na slici 4, staklasti je materijal silikatnog sastava koji sadrži 2-6% vode te se stvara tijekom vulkanskih erupcija.[3,8] Proizvodi se drobljenjem agregata koji se zatim naglo zagrijava na temperaturu između 700 i 1200°C pri kojoj voda disocira. [3] Volumenska masa perlita iznosi od 100 do 500 kg/m<sup>3</sup>. [8] Perlit je vrlo porozan agregat i posjeduje malu čvrstoću te se stoga upotrebljava za nenosive izolacijske elemente.[1]



Slika 4 Perlit [9]

Ekspandirani vermikulit dobiva se iz stijene vermikulita i prikazan je na slici 5. Prirodna sirova ruda vermikulit posjeduje volumensku masu od 600 do 1100 kg/m<sup>3</sup>, te se ona nakon dopremanja iz rudnika suši, drobi i graduira. [3]



Takav drobljeni vermikulit se zatim izloži temperaturi od 800 do 1000°C u trajanju 3-5 minuta pri čemu materijal ekspandira te može povećati svoj volumen i do 20 puta.[8] Ekspandirani vermikulit ima volumensku masu 50-200 kg/m<sup>3</sup> i koristi se za proizvodnju betona vrlo visokih termoizolacijskih svojstava.[8]



Slika 5 Ekspanidrani vermikulit [10]

Ekspandirana glina (slika 6) proizvodi se u rotacijskim pećima pri 1200°C mokrim postupkom.[3] Dobiva se miješanjem gline s vodom pri čemu nastaje pasta, a zatim se ta pasta odvodi u dio rotacijske peći gdje lomljenjem nastaju manja zrna. Takvim procesom nastaju zrna različitih oblika i veličina koja se kasnije prosijavaju. Volumenska masa i čvrstoća variraju ovisno o veličini zrna, a veći su što je zrno manje.[3] Volumenska masa ekspandirane gline varira od 350 do 500 kg/m<sup>3</sup>. [11] Za razliku od perlita i ekspandiranog vermikulita, ekspandirana glina ima manje poroznu strukturu pa se pomoću takvog agregata mogu proizvoditi i nosivi i izolacijski elementi.[1]



Slika 6 Ekspandirana glina [8]

Leteći pepeo nastaje kao nusproizvod pri izgaranju ugljena u termoelektranama. Sastoji se od malih sferičnih čestica aluminosilikatnog stakla, a osim što se primjenjuje kao dodatak cementu i mineralni dodatak betonu, od njega se može proizvesti lagani agregat koji je vidljiv na slici 7.[1] Postupak proizvodnje takvog laganog agregata sastoji se od peletiziranja letećeg pepela i sinteriranja u rotacijskoj peći na temperaturi od 1000 do 1200°C.[1] Volumenska masa letećeg pepela iznosi od 800 do 850 kg/m<sup>3</sup>. [11]



Slika 7 Agregat od letećeg pepela [12]

Zgura je tekućeg oblika u kojem ima zarobljenih plinova prilikom izlaska iz visoke peći.[1] Ovisno o metodi hlađenja razlikuju se tri vrste zgure: zrakom hlađena zgura, granulirana zgura i ekspanzirana zgura.[1] Ukoliko se zgura tretira s ograničenom količinom vode ili pare nastaje proizvod koji se naziva ekspanzirana zgura (slika 8) i takav se agregat koristi za proizvodnju laganih betona.[1] Volumenska masa zgure visokih peći iznosi od 850 do 950 kg/m<sup>3</sup>. [11]



Slika 8 Ekspanzirana zgura [13]

Prirodni agregat većinom je vulkanskog podrijetla i zbog toga je dostupan samo u pojedinim dijelovima svijeta. Najčešće su korišteni plovućac i zgura koji su porozni i imaju malu čvrstoću.[1] Plovućac se formira kad se rastopljen silicijev dioksid nastao tijekom erupcije vulkana ohladi. Mala volumenska masa plovućca, koja iznosi od 500 do 880 kg/m<sup>3</sup>, proizlazi iz mjehurića zraka koji su nastali tijekom topljenja lave.[3] Zbog male volumenske mase plovućca i beton proizveden od takvog agregata ima malu volumensku masu što prouzrokuje smanjenje težine konstrukcije.[3] Zgura je materijal sličan plovućcu, no tamnije je boje i sadrži veća i pravilnija zrna koja nisu povezana. [3] Osim zgure i plovućca, u dijelovima svijeta gdje je prisutna industrija proizvodnje palminog ulja, koriste se ljuske palminog ulja kao agregat za izgradnju konstrukcija niske cijene. Svojstva laganog betona od takvog agregata slična su svojstvima laganog betona proizvedenog koristeći klinker, šljaku ili ekspanđiranu glinu kao agregat.[3] Ljuske nastaju kao izlomljeni dijelovi prilikom procesa izvlačenja ulja i sadrže velike dijelove koji se uklanjaju ručnim prosijavanjem te se nakon toga suše na zraku prije upotrebe. Tlačna čvrstoća kocke laganog betona od takvog agregata nakon 28 dana varira između 5,0 i 19,5 MPa.[3]

Lagani agregati zbog svoje porozne strukture mogu apsorbirati određenu količinu vode pa im je, uz volumensku masu, bitno svojstvo i vodoupojnost.[1] Postotci vodoupojnosti i vrijednosti volumenskih masa za različite lagane agregate dani su u tablici 1. Uz to, u tablici 1 prikazane su i vrijednosti tlačnih čvrstoća betona koje se mogu dobiti upotrebom različitih laganih agregata.

Tablica 1 Volumenska masa i vodoupojnost laganih agregata, tlačne čvrstoće betona ovisno o vrsti laganog agregata [1,3,11]

| Lagani agregat          | Volumenska masa<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | Vodoupojnost<br>[%] | Tlačna čvrstoća<br>betona [N/mm <sup>2</sup> ] |
|-------------------------|---|---------------------|--|
| Perlit                  | 100 - 500                               | 2 - 6               | < 10   |
| Ekspanđirani vermikulit | 50 - 200                                | < 5                 | < 10   |
| Ekspanđirana glina      | 350 - 500                               | 12 - 14             | < 30   |
| Leteći pepeo            | 800 - 850                               | 9 - 15              | > 40   |
| Ekspanđirana zgura      | 850 - 950                               | 3 - 5               | > 40   |

### 3.2 Cement

Cement je hidraulično građevno vezivo koje samostalno očvrstne na zraku i pod vodom.[1] Pri proizvodnji laganog betona minimalna potrebna količina cementa iznosi  $300 \text{ kg/m}^3$  te ne smije prelaziti  $450 \text{ kg/m}^3$ . [7] U današnje vrijeme većinom se koristi portland cement koji sadrži dobra svojstva, no zbog velike energije potrebne za proizvodnju takvog cementa, zbog slabe ili skoro nepostojeće reakcije s glinom i česticama prašine, te zbog potrebe korištenja finih i grubih agregata njegova upotreba se izbjegava pri proizvodnji betona visokih svojstava.[3] Svi nedostaci portlanskog cementa proizlaze iz činjenice da on sadrži veliku količinu kalcijevog oksida (63-67%).[3] Uslijed razvoja industrije i povećanja zagađenja okoliša raste potreba za betonom boljih trajnosnih svojstava što je dovelo do proizvodnje veziva koji će doprinijeti nastanku takvog betona. Pucolanski materijali očvršćuju matricu morta i mijenjanju mikrostrukturu.[3] Oni pomiješani s vodom ne očvršćuju, ali samljeveni i na sobnoj temperaturi u prisutnosti vode reagiraju s otopljenim kalcijevim hidroksidom pri čemu stvaraju spojeve kalcijevih silikata i kalcijevih aluminata koji razvijaju čvrstoće.[1]

Za proizvodnju cementa koriste se i mineralni dodatci kao što su leteći pepeo, silicijska prašina i zgura visokih peći koji doprinose poboljšanju svojstava čvrstoće i trajnosti.[1,3] Silicijska prašina, koja se koristi za proizvodnju laganog betona visokih čvrstoća, nastaje redukcijom kvarca visoke čvrstoće ugljenom, u pećima s električnim lukom pri proizvodnji silicijskih i ferosilicijskih legura, a sastoji se od vrlo finih kuglastih čestica koje sadržavaju najmanje 85% masenog udjela amorfnog silicijevog dioksida.[1,3] Ona pomiješana s letećim pepelom i zgurom visokih peći izaziva brzu hidrataciju te nadoknađuje spori razvoj čvrstoće betona u ranijim fazama što je slučaj kad se koriste samo leteći pepeo i zgura visokih peći kao mineralni dodatci cementu.[3] Maseni udio silicijske prašine u cementu na smije prelaziti 10%. [1] Leteći pepeo koji se smije upotrebljavati u cementu dobiva se elektrostatičkim ili mehaničkim taloženjem praškastih čestica iz dimnih plinova peći loženih ugljenom prašinom.[1] Utjecaj letećeg pepela na hidrataciju cementne paste ne može se točno odrediti zbog njegove nehomogenosti i činjenice da njegov kemijski sastav može varirati od jedne do druge čestice.[3] Budući da je leteći pepeo sporo reaktivan pucolanski materijal, njegove čestice su u ranijim fazama hidratacije inertne, a tek u kasnijim fazama poboljšavaju hidrataciju cementa.[3]

Zaključno, lagani beton može se proizvesti od bilo kojeg dostupnog cementa, ali se preporučuje korištenje cementa s malom toplinom hidratacije kao što je cement sa zgurom visokih peći pri čemu zgura smanjuje toplinu hidratacije.[6] Može se koristiti i cement s dodatkom letećeg pepela ili vapnenca.[6]

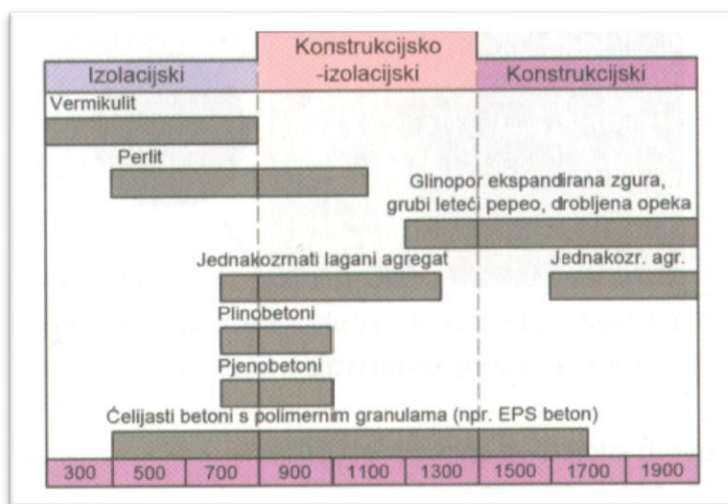
### **3.3 Voda i dodatci betonu**

Voda i njena kvaliteta bitno utječu na svojstva svježeg i očvrsnulog betona u vidu obradivosti, trajnosti, udjela pora, čvrstoće i vremena vezivanja.[1] Uz to, voda se koristi i za njegu betona nakon ugradnje kako bi se izbjegla pojava pukotina. Kao kod običnog betona, lagani beton se većinom proizvodi upotrebom pitke vode.[1] Osim pitke vode, može se upotrebljavati i povratna voda iz procesa industrije betona, voda iz podzemnih izvora, prirodna površinska voda te industrijska otpadna voda, za razliku od vode iz kanalizacije koja nije prikladna za primjenu u betonu.[1,6]

Pored mineralnih dodataka, koriste se i kemijski dodatci betonu. Jedni od njih su superplastifikatori, površinski aktivne tvari koji omogućavaju smanjenje potrebe za vodom pri čemu se zadržava ista konzistencija betona.[1,3] Superplastifikatori reagiraju različito sa različitim cementima, a to najviše ovisi o sulfatima i aluminatima u cementu.[3] Superplastifikatori između ostalog utječu i na obradivost cementne paste.[3] Kod proizvodnje betona koriste se i aeranti koji uzrokuju uvlačenje zraka i tako povećavaju otpornost betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja.[1]

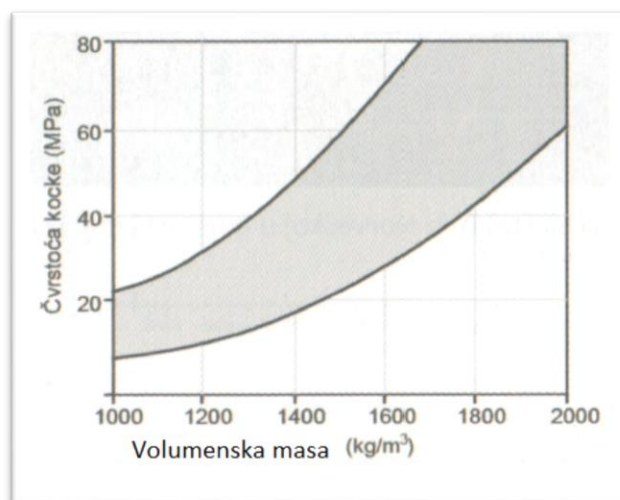
#### 4 PODJELA LAGANIH BETONA PREMA TEHNOLOGIJI

Prema tehnologiji lagani betoni dijele se na lakoagregatne, ćelijaste i betone od jednakozrnatog agregata. Slika 9 prikazuje podjelu laganih betona prema volumenskoj masi ovisno o načinu proizvodnje i o tome koriste li se kao izolacijski ili kao konstruktivni elementi.[1]



Slika 9 Vrste i volumenske mase laganih betona ovisno o vrsti proizvodnje [1]

Vrsta korištenog agregata, njegov mineraloški sastav, volumenska masa, volumen i poroznost pri proizvodnji laganog betona znatno utječu na vrijednosti tlačne čvrstoće koje su u ovisnosti o volumenskoj masi vidljive na slici 10.[1,7]

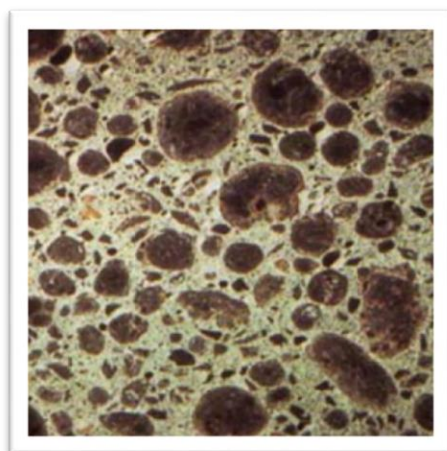


Slika 10 Odnos tlačne čvrstoće i volumenske mase raznih laganih betona [1,7]

## 4.1 Lakoagregatni betoni

Kod takve vrste betona krupni agregat zamijenjen je laganim agregatom, a sitna frakcija 0-4 mm je prirodni materijal.[8] Ovisno o vrsti laganog agregata dijele se na lakoagregatne betone od prirodnog agregata, od ekspandiranog i pečenog agregata i agregata od sekundarnih sirovina.[8] Svi lagani agregati imaju sličnu strukturu sa velikim brojem šupljina pri čemu je unutrašnjost poroznija, a izvana se nalazi gusta ljuska.[8] Kod proizvodnje lakoagregatnih betona potrebno predobraditi agregat, odnosno potrebno ga je zasititi vodom prije no što se agregat doda u mješavinu betona.[1] Osim toga, potrebna je primjena dodataka koji poboljšavaju obradivost, smanjuju segregaciju i izdvajanje vode te poboljšavaju otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja te primjena posebne završne obrade površine takvog betona.[1]

Za proizvodnju lakoagregatnog betona od prirodnog agregata najčešće se kao agregat koristi plovuće.[1] Ukoliko je kao agregat korištena ekspandirana glina to rezultira betonom veće čvrstoće, ali i veće vodoupojnosti agregata u odnosu na ostale vrste laganih betona.[1] Presjek lakoagregatnog betona proizvedenog upotrebom ekspandirane gline dan je na slici 11.[8] Uporabom perlita, odnosno ekspandiranog stakla, dobit će se beton vrlo male volumenske mase i čvrstoće sa velikim skupljanjem i upijanjem vlage, a ista svojstva vrijede i ukoliko se koristi ekspandirani vermikulit.[1] Kao sekundarne sirovine koriste se industrijski nusproizvodi iz termoelektrana, odnosno leteći pepeo, iz željezara zgura ili drobljena opeka nastala pri proizvodnji opeke.[1] Agregat od drobljene opeke porozan je i po svojoj strukturi nalikuje agregatu od sinterirane gline.[3]



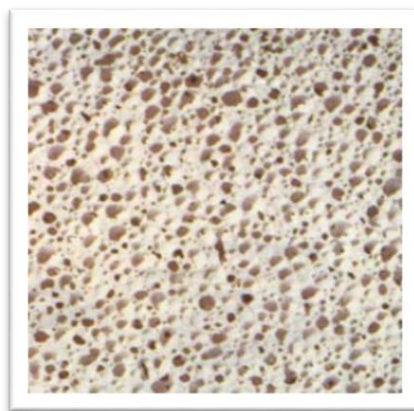
Slika 11 Presjek lakoagregatnog betona od ekspandirane gline [8]

## 4.2 Čelijasti betoni

Nastaju primjenom sredstava za proizvodnju plina ili pjene pri čemu se dobiva porasta struktura.[1] Dije se na plinobetone, pjenobetone i lagani beton od ekspaniranog polistirena.[8] Kod takvih betona ne koristi se grubi agregat, a preporuča se da maksimalna veličina zrna finog agregata ne prelazi 5 mm.[14] Fini agregat moguće je djelomično ili skroz zamijeniti recikliranim ili sekundarnim materijalima kao što su leteći pepeo, reciklirano staklo ili ekspanirane granule polimera.[14]

### 4.2.1 Plinobetoni

Plinobetoni nastaju u tvorničkim uvjetima kao predgotovljeni elementi u uređajima za zagrijavanje tvari pod tlakom, tzv. autoklavima.[1] U mješavinu se dodaje prah koji reagira sa  $\text{Ca(OH)}_2$  i alkalijama, a tijekom reakcije dolazi do ekspanzije plina u još svježoj smjesi što rezultira nastajanjem mjehurića i stvaranjem porozne ćelijaste strukture.[8] Ekspanzija plina postiže se dodavanjem aluminijskog praha koji razvija vodik, a tu tehniku razvio je proizvođač Siporex. Osim aluminijskog praha, koncern Ytong, kao dodatak koristi kalcijev karbid  $\text{Ca}_2\text{C}$  čijim dodavanjem se u smjesi razvija acetylen.[1] Kao sirovine za plinobeton se uz cement koriste i vapno, leteći pepeo i kvarcni pijesak koji mora biti sitno samljeven.[1] Presjek plinobetona prikazan je na slici 12.[8]



Slika 12 Presjek plinobetona [8]

Volumenska masa, tlačna čvrstoća i toplinska vodljivost plinobetona proizvedenog u autoklavima prikazani su u tablici 2.[8] Najveća tlačna čvrstoća iznosi im  $7,5 \text{ N/mm}^2$ , a zbog malih vrijednosti toplinske vodljivosti, kao i ostale vrste laganih betona, posjeduju dobra izolacijska svojstva.



Tablica 2 Svojstva autoklaviranog plinobetona [8]

| Volumenska masa [ $\text{kg/m}^3$ ] | Tlačna čvrstoća [MPa] | Toplinska vodljivost [W/mK] |
|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| 450                                 | 3,2                   | 0,12                        |
| 525                                 | 4,0                   | 0,14                        |
| 600                                 | 4,5                   | 0,16                        |
| 675                                 | 6,3                   | 0,18                        |
| 750                                 | 7,5                   | 0,20                        |

#### 4.2.2 Pjenobetoni

Pjenobetoni, vrsta porastih betona u kojima je volumen zraka veći od 25%, mogu se izvoditi na gradilištu ili u industrijskim uvjetima.[1,8] S obzirom na način zarobljavanja zraka u mješavini mogu se proizvoditi na način da se unaprijed pripremljena pjena miješa s ostalim sastojcima u miješalici ili automikseru ili na način da se doda kemijski dodatak za pjenjenje zajedno s ostalim sastojcima u posebnu miješalicu pri čemu se vrši brzo miješanje.[8] Neovisno o načinu proizvodnje, dobivena smjesa mora ostati stabilna prilikom miješanja, transporta i ugradnje.[8] Kad je takav beton očvrstnuo, veličine zračnih mjehurića koje taj beton posjeduje iznose od 0,1 do 1 mm.[8] Ovisno o udjelu sastojaka, pjenobetoni mogu posjedovati volumensku masu od 400 do 2000  $\text{kg/m}^3$ . [1] Tipični sastavi pjenobetona kao i njegova svojstva dani su u tablicama 3 i 4 pri čemu je vidljivo da se kao filer većinom koristi leteći pepeo ili pijesak te da tlačna čvrstoća takvih betona ne prelazi 10  $\text{N/mm}^2$ . [8]

Tablica 3 Tipični sastavi pjenobetona [8]

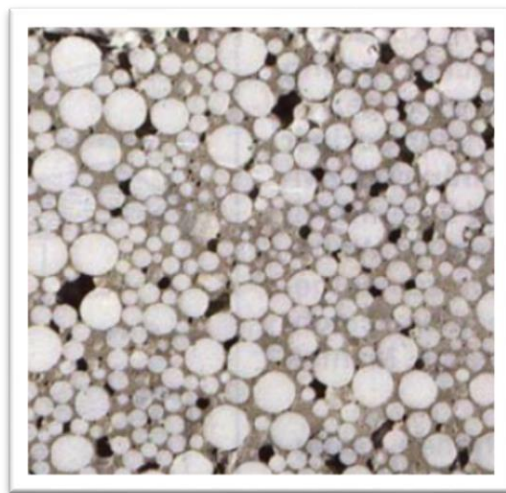
| Volumenska masa [ $\text{kg/m}^3$ ] | 500 | 525 | 600     | 1200    | 1200 |
|-------------------------------------|-----|-----|---------|---------|------|
| Cement [ $\text{kg/m}^3$ ]          | 160 | 340 | 340     | 340     | 340  |
| Volumen pjene [%]                   | 72  | 73  | 69      | 44      | 39   |
| Vrsta filera                        | LP  | -   | Pijesak | Pijesak | LP   |
| Količine filera [ $\text{kg/m}^3$ ] | 160 | 0   | 66      | 635     | 486  |
| Tlačna čvrstoća, 28 dana [MPa]      | 1,0 | 2,0 | 2,0     | 6,0     | 7,5  |

Tablica 4 Tipična svojstva pjenobetona [8]

| Gustoća [ $\text{kg/m}^3$ ] | Tlačna čvrstoća [MPa] | Toplinska provodljivost [W/mK] |
|-----------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| 400                         | 0,5 - 1,0             | 0,10                           |
| 600                         | 1,0 - 1,5             | 0,11                           |
| 800                         | 1,5 - 2,0             | 0,17 - 0,23                    |
| 1000                        | 2,5 - 3,0             | 0,23 - 0,30                    |
| 1200                        | 4,5 - 5,5             | 0,38 - 0,42                    |
| 1400                        | 6,0 - 8,0             | 0,50 - 0,55                    |
| 1600                        | 7,5 - 10,0            | 0,62 - 0,66                    |

#### 4.2.3 Lagani beton od ekspaniranog polistirena

Lagani beton od ekspaniranog polistirena je vrsta betona u kojem su sve ili pojedine frakcije agregata zamijenjene ekspaniranim polistirenskim granulama, a njegova porozna mikrostruktura prikazana je na slici 13.[1,8] Količina takvih granula mijenja se ovisno o zahtijevanoj volumenskoj masi i čvrstoći betona pri čemu veća količina takvih granula znači manje pijeska i obrnuto.[1] Glavne karakteristike takve vrste ćelijastog betona su dobra toplinsko-izolacijska svojstva i mala vodoupojnost.[1]



Slika 13 Presjek mikrostrukture laganog betona od EPS-a [8]

### 4.3 Lagani betoni od jednakozrnatog agregata

Lagani beton od jednakozrnatog agregata proizvodi se izostavljanjem sitne frakcije agregata i uporabom jedne frakcije nazivno iste veličine zrna.[1] Takav beton sastoji se od grubog agregata čija veličina se kreće od 4 mm pa na dalje, a pritom je najveće zrno koje se može koristiti veličine od 10 do 20 mm.[3,8] Fini agregat je izostavljen, pa se mješavina betona sastoji od cementa, vode i grubog agregata, a ponekad se cementnoj pasti dodaju mineralni dodatci kao što je zgura i leteći pepeo ili male količine filera ili sitnog pijeska zbog ekonomskih ili tehničkih razloga.[3] Velike šupljine u betonskoj mješavini, koje su vidljive na slici 14, javljaju se jer su zrna agregata obavijena cementnom pastom debljine 1,3 mm.[8]



Slika 14 Lagani beton od jednakozrnatog agregata [8]

Uslijed korištenja samo jedne frakcije, a ne primjene granulometrijskog sastava agregata, ovakvi betoni posjeduju manju čvrstoću i volumensku masu u odnosu na ostale lagane betone. Vrijednosti tlačne čvrstoće ovise o podrijetlu i volumenskoj masi agregata i količini cementa, pa ukoliko je potrebno povećati tlačnu čvrstoću to je moguće učiniti korištenjem laganog agregata veće volumenske mase, dodavanjem još jedne sitnije frakcije agregata, povećanjem količine cementa ili mineralnih dodataka.[3] Vodocementni omjer laganog jednakozrnatog betona iznosi od 0,35 do 0,45 pa zbog nepostojanja kapilarnih pora ovakav je beton otporan na cikluse smrzavanja i odmrzavanja.[1] Uz otpornost na smrzavanje i odmrzavanje, lagani beton od jednakozrnatog agregata dobro apsorbira zvuk ukoliko se njegova površina ne zagladi pa nailazi na primjenu u zgradama gdje je potrebna dobra zvučna izolacija.[8] Također se primjenjuje kao površinski sloj na parkiralištima i pješačkim stazama, kod izvođenja bankina, rubova rubnih trakova, drenažnih slojeva i bukobrana.[8]

## 5 MEHANIČKA I TRAJNOSNA SVOJSTVA LAGANOG BETONA

### 5.1 Mehanička svojstva

Volumenska masa laganih betona proteže se u rasponu od 300 do 2000 kg/m<sup>3</sup>. [1] Smanjenje volumenske mase laganih betona u odnosu na obične postiže se stvaranjem pora u agregatu, stvaranjem međuprostora između krupnih zrna agregata ili pora u mortu. [2] Toplinska vodljivost laganog betona iznosi od 0,2 do 1,0 W/mK pa ga to čini dobrim izolatorom te zbog toga nailazi na sve veću primjenu. [8]

Zbog poraste strukture čvrstoća laganih betona i njihova otpornost na habanje smanjeni su u odnosu na obični beton. Vrijednosti modula elastičnosti, pri čemu modul elastičnosti predstavlja omjer naprezanja i deformacije u elastičnom području i iskazuje se u N/mm<sup>2</sup>, su kod laganih betona smanjene zbog poraste strukture pa to čini lagani beton krutijim od običnog betona. [1,8]

Čvrstoća je svojstvo koje pokazuje koliko naprezanje materijal može podnijeti u trenutku sloma. S obzirom da je vlačna čvrstoća betona vrlo mala, u proračunu se u obzir uzima tlačna čvrstoća. Tlačna čvrstoća kao osnovno svojstvo betona definira se razredom tlačne čvrstoće  $C_{f_{ck,cyl}/f_{ck,cube}}$  pri čemu  $f_{ck}$  označava karakterističnu tlačnu čvrstoću betona u mjernoj jedinici N/mm<sup>2</sup> pri starosti 28 dana, dobivenu na valjcima visine 30 cm i promjera 15 cm ili kockama bridova 15 cm, pri jednoosnom tlaku. [1] Razredi tlačnih čvrstoća za lagane betone označavaju se oznakom LC i prikazani su u tablici 5. [7]

Tablica 5 Razredi tlačne čvrstoće laganih betona [7]

| Razred tlačne čvrstoće | Najmanja karakteristična čvrstoća valjka, $f_{ck,cyl}$ [N/mm <sup>2</sup> ] | Najmanja karakteristična čvrstoća valjka, $f_{ck,cube}$ [N/mm <sup>2</sup> ] |
|------------------------|---|--|
| LC 8/9                 | 8   | 9  |
| LC 12/13               | 12  | 13   |
| LC 16/18               | 16  | 18   |
| LC 20/22               | 20  | 22   |
| LC 25/28               | 25  | 28   |
| LC 30/33               | 30  | 33   |
| LC 35/38               | 35  | 38   |
| LC 40/44               | 40  | 44   |
| LC 45/50               | 45  | 50   |
| LC 50/55               | 50  | 55   |
| LC 55/60               | 55  | 60   |
| LC 60/66               | 60  | 66   |
| LC 70/77               | 70  | 77   |
| LC 80/88               | 80  | 88   |

Za lagane betone tlačna čvrstoća kreće se u rasponu od 1 do 60 N/mm<sup>2</sup>. Iako su u tablici prikazani razredi do LC 80/88 sa karakterističnom tlačnom čvrstoćom kocke od 88 N/mm<sup>2</sup>, u praksi se ne koriste lagani betoni razreda većeg od LC 55/60 osim ako je potreba za takvim betonom dokazana i opravdana.[7] Dobivene vrijednosti tlačne čvrstoće mogu varirati ovisno o svojstvima komponenata betona, brzini nanošenja opterećenja, stanju vlažnosti, obliku i dimenzijama uzorka na kojem je provedeno ispitivanje, poroznosti cementne paste i agregata te o kvaliteti sučeljka.[1]

Prema vrijednostima volumenske mase, tlačne čvrstoće i toplinske provodljivosti lagani betoni se dijele na konstrukcijske, konstrukcijsko-izolacijske i izolacijske lagane betone (tablica 6). [1,15,16]

Tablica 6 Podjela laganih betona prema namjeni [1,11]

| Svojstvo                                  | Konstrukcijski | Konstrukcijsko-izolacijski | Izolacijski |
|---|----------------|----------------------------|-------------|
| Volumenska masa ( $\text{kg/m}^3$ )       | 1600 - 2000    | < 1600                     | << 1450     |
| Tlačna čvrstoća (MPa)                     | > 15,0         | > 3,5                      | > 0,5       |
| Toplinska provodljivost ( $\text{W/mK}$ ) | -              | < 0,75                     | > 0,3       |

Skupljanje, svojstvo koje se javlja zbog smanjenja vlažnosti, a očituje se u obliku smanjenja dimenzija neopterećenih betonskih elemenata tijekom vremena, i bubrenje, pojava suprotna skupljanju, postižu velike vrijednosti kod laganih betona.[1] Svojstvo puzanja definira se kao povećanje deformacije pod djelovanjem konstantnog opterećenja, događa se istovremeno s deformacijom skupljanja, ovisi o sušenju i otpuštanju vode u ranim fazama te je i njegova vrijednost velika kod upotrebe laganog betona.[1]

Kod običnih betona, agregat koji se koristi ima 4 do 6 puta veću krutost u odnosu na mortnu matricu koja ga okružuje pa to uzrokuje velika naprezanja u betonu, za razliku od laganog betona kod kojeg korišteni agregat ima otprilike jednaku krutost kao mortna matrica pa je naprezanje ili potpuno eliminirano ili je djelomično smanjeno.[7] Zbog smanjene koncentracije naprezanja kod laganih agregata, smanjena je pojava mikropukotina u laganom betonu što rezultira smanjenjem propusnosti betona i sprječavanjem prolaska tvari koje bi mogle uzrokovati koroziju ugrađene armature u beton.[15]

Upotrebom laganog betona postiže se smanjenje vlastite težine i stalnog opterećenja, poboljšavaju se toplinska svojstva, povećava se otpornost na požarna opterećenja, smanjuju se troškovi oplata i rukovanja i prijevoza predgotovljenih elemenata, no uslijed veće potrebe za cementom, kako bi se nadoknadili nedostaci laganog agregata, skuplji su u odnosu na obični beton te njihova proizvodnja, transport i ugradnja zahtijevaju više pažnje radi postizanja željene kakvoće.[1,8]

## 5.2 Trajnosna svojstva

Lagani betoni mogu postići istu trajnost kao i obični betoni pri čemu trajnost betona označava njegovu otpornost na kemijske, fizikalne, mehaničke i biološke procese razaranja iz okoliša.[1]

### 5.2.1 Kemijska postojanost

Pod pojmom kemijska postojanost podrazumijeva se otpornost betona na plinove, kemikalije i temperaturne promjene koji kemijski reagiraju sa komponentama veziva betona pri tome uzrokujući smanjenje kvalitete betona.[3] Ovisno o različitim vrstama cementa, mineralnih dodataka i agregata koji su korišteni pri projektiranju laganog betona, različiti je stupanj smanjenja.

#### 5.2.1.1 Djelovanje kiselina

Otpornost na kiseline varira s obzirom o kakvoj se kiselini radi i koja vrsta laganog betona je korištena. Satish Chandra je proveo ispitivanje trajnosti laganog betona prema djelovanju triju kiselina: klorovodične, sumporne i mliječne kiseline.[3] Uz lagani beton, istraživanje je provedeno i na običnom betonu. Kao kemijski dodatak korišten je „CEMOS“ tj. asfaltom modificirani akrilni polimer čija je uloga raspršiti agregat, stvoriti hidrofobnost i djelovati kao dodatak koji služe za uvlačenje zraka.[3] Osim CEMOS-a korišten je i dodatak za uvlačenje zraka „CAEA“. Mort na uzorku prizme veličine 6 x 6 x 12 cm izliven je i držan pod vodom 5 dana, a nakon toga premješten je u sobu relativne vlažnosti 55% i temperature 20°C. Upotrebjeno vezivo je portland cement, kao lagani agregat korištena je ekspanzirana glina proizvedena u rotacijskim pećima, a postotci kiselina su 15% za klorovodičnu, 5% za sumpornu i 5% za mliječnu.[3]

U tablici 7 dane su vrijednosti volumenske mase agregata, količine cementa i dodataka koji su bili korišteni u istraživanju za proizvodnju običnog betona (oznaka N), običnog betona s dodatkom CEMOS-a (oznaka NA), laganog betona s dodatkom CEMOS-a (oznaka L) i laganog betona s dodatkom za uvlačenje zraka (oznaka LB). [3] Dodatci „CEMOS“ i „CAEA“ dodaju se u postotcima na količinu cementa.

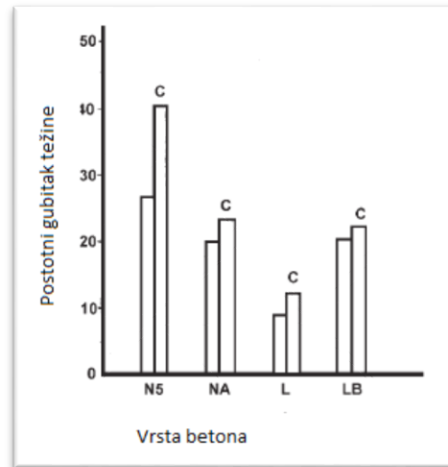
Tablica 7 Sastav betona, gustoća i tlačna čvrstoća [3]

| Vrsta betona | Dodatak u % na težinu cementa | Cement [kg/m <sup>3</sup> ] | Pijesak/Šljunak [kg/m <sup>3</sup> ] |                 | Pijesak/Lagani agregat [kg/m <sup>3</sup> ] |                       |                        | v/c omjer | Volumenska masa [kg/m <sup>3</sup> ] | Tlačna čvrstoća nakon 28 dana [MPa] |
|--------------|-------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|-----------------|---|-----------------------|------------------------|-----------|--------------------------------------|-------------------------------------|
|              |                               |                             | Pijesak 0-8 mm                       | Šljunak 8-16 mm | Pijesak 0-4 mm                              | Lagani agregat 2-4 mm | Lagani agregat 4-12 mm |           |                                      |                                     |
| N            | -                             | 500                         | 930                                  | 750             | -   | -                     | -                      | 0.45      | 2400                                 | 45.0                                |
| NA           | CEMOS 1.5                     | 500                         | 930                                  | 750             | -   | -                     | -                      | 0.41      | 2180                                 | 33.2                                |
| L            | CEMOS 1.5                     | 315                         | -                                    | -               | 305   | 120                   | 285                    | 0.60      | 1247                                 | 18.0                                |
| LB           | CAEA 0.05                     | 315                         | -                                    | -               | 305   | 120                   | 285                    | 0.55      | 1350                                 | 20.4                                |

N – običan beton  
 NA – običan beton s dodatkom CEMOS-a  
 L – lagani beton s dodatkom CEMOS-a  
 LB – lagani beton s dodatkom CAEA-e

Klorovodična kiselina djeluje na očvrsnuli beton procesom otapanja, odnosno stvaranjem topivih soli, a uz to javlja se i ispiranje. Tijekom tog procesa pH vrijednost kiseline raste, a posljedično tome nastavlja se hidroliza i s vremenom nastaju gelovi silicija, aluminijski i željezni. [3] Pogoršanje kvalitete betona djelovanjem klorovodične kiseline u vidu gubitka težine betona prikazano je na slici 15, a po rezultatima je vidljivo da najmanja šteta, odnosno najmanji postotak gubitka težine prisutan u laganom betonu s dodatkom CEMOS-a, a najveći u običnom betonu bez ikakvih dodataka.

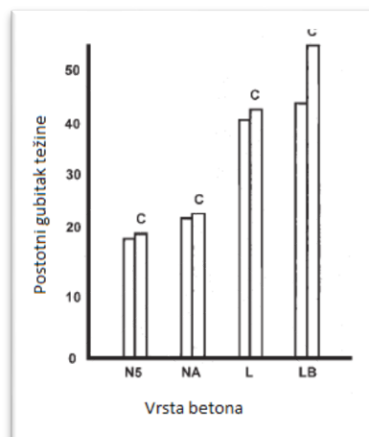




Slika 15 Postotni gubitak težine betona pri djelovanju 15% klorovodične kiseline nakon 3 mjeseca [3]

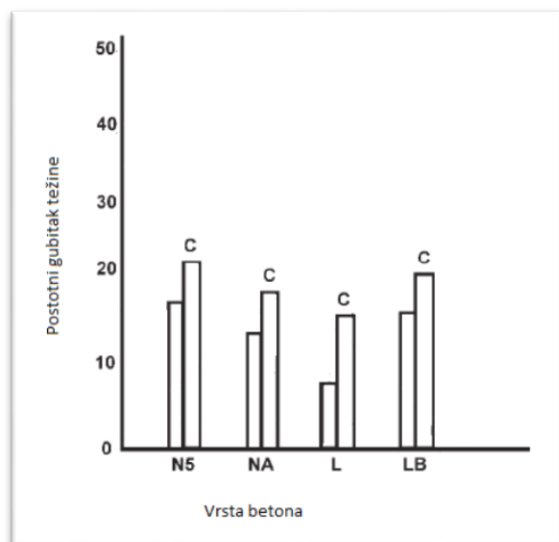
Lagani beton s dodatkom CEMOS-a podnio je manja oštećenja od laganog betona s dodatkom za uvlačenje zraka zbog mikročestica uvedenih pri dodavanju CEMOS-a koje uzrokuju kompaktniju strukturu betona i zbog svog hidrofobnog karaktera smanjuju upijanje pa je kiselina sporije ulazila u beton.[3]

Djelovanje sumporne kiseline na hidratizirani portland cement je dvostruko. Prvo je djelovanje iona vodika, a drugo sumpornih iona pri čemu se stvaraju soli kalcijev sulfat od sulfatnih iona te kalcijev hidroksid i etringit od kalcijevog sulfata i kalcijevog aluminata.[3] Takve soli prilikom svog nastanka ekspandiraju i uzrokuju pucanje betona. Na slici 16 uočljivo je da je sumporna kiselina najveći utjecaj gubitka težine ostavila na laganom betonu s dodatkom za uvlačenje zraka, a vidljivi razlozi toga su širenje cementne paste i povećana propusnost tog betona.[3]



Slika 16 Postotni gubitak težine betona pri djelovanju 5% sumporne kiseline nakon 6 tjedana [3]

Pri izlaganju betona 5% mliječnoj kiselini stvara se sol kalcijev laktat koja se lako može razdvojiti i pri tome povećati vodljivost. Uzorcima betona nije puno pogoršana kakvoća, ali su iz istih razloga kao i kod djelovanja klorovodične kiseline, lagani betoni bolje podnijeli djelovanje kiseline od običnih betona, a to je dokazano i manjim gubitkom težine laganih betona što je prikazano na slici 17.



Slika 17 Postotni gubitak težine betona pri djelovanju 5% mliječne kiseline nakon 3 mjeseca [3]

Ovo istraživanje pokazalo je da lagani beton s dodatkom CEMOS-a ima bolju otpornost na klorovodičnu i mliječnu kiselinu zbog hidrofobnog svojstva CEMOS-a. Obični beton sadrži više cementa u odnosu na lagani beton, a pri većoj količini cementa nastaje više kalcijevog hidroksida  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  koji reagira s klorovodičnom kiselinom  $\text{HCl}$  i pri tome stvara kalcijev klorid  $\text{CaCl}_2$  koji se ispire pa iz tog razloga beton gubi svoju čvrstoću. Osim toga, djelovanje kiselina povećava poroznost i time omogućuje lakše prodiranje budućih kiselina. Zbog porozne prirode agregata korištenog pri proizvodnji laganog betona, vezivo prodire u agregat i time zona sučeljka između agregata i cementne paste postaje jača, pa djelovanje kiseline na površini ne uništava u potpunosti agregat kao kod običnog betona.[3] Lagani beton ima manju čvrstoću od običnog betona pa zbog naprezanja nastalih zbog etringita i gipsa koji se stvaraju djelovanjem sumporne kiseline, lagani beton u tom slučaju trpi veća oštećenja.[3]

### 5.2.1.2 Alkalnoagregatna reakcija

Alkalni ioni, prisutni u cementu, mogu reagirati sa silicijem koji se može nalaziti u nekim vrstama agregata. Takva reakcija dovodi do bubrenja gela koji uništava vezu agregata i cementne paste i stvaranja pukotina u betonu.[1] Pri proizvodnji laganog betona dio agregata zamijenjen je laganim agregatom koji je ili vulkanskog podrijetla ili je nastao preradom u tvornicama (ekspandirana glina, leteći pepeo, zgura visokih peći) i nije osjetljiv na alkalijske pa je opasnost od alkalnoagregatne reakcije smanjena.[3] Ukoliko je beton napravljen s dodatkom mineralnih dodataka kao što je silicijska prašina ili kemijskih dodataka kao što su superplastifikatori, njegov vodocementni omjer je mali što uzrokuje smanjenje propusnosti. Osim smanjenja propusnosti, takvi dodatci uzrokuju smanjenje djelovanja alkalijske na portland cement pa se samim time reducira i mogućnost pojave alkalnoagregatne reakcije.[3]

### 5.2.1.3 Karbonatizacija

Ugljikov dioksid iz prirode prodirući u beton reagira s kalcijevim hidroksidom nastalim tijekom hidratacije portland cementa i C-S-H gelom, a taj proces naziva se karbonatizacija.[1,3] Kalcijev hidroksid koji je prisutan u porama betona osigurava alkalinitet betona i štiti čelik u betonu od korozije. Vrijednost pH betona obično iznosi 13.5, a pri reakciji ugljikovog dioksida s kalcijevim hidroksidom taj se pH smanjuje na 8.5.[3] To smanjenje pH vrijednosti i dubina do koje je došlo do karbonatizacije mjeri se fenolftaleinom pri čemu ružičasti dio prikazuje nekarbonatizirani dio betona, a jedno takvo ispitivanje prikazano je na slici 18.[1]



Slika 18 Ispitivanje dubine karbonatizacije fenolftaleinom [1]

Mikrostruktura laganog betona, osim o cementu ovisi i o vrsti laganog agregata koji je korišten. Lagani agregati imaju poroznu strukturu pa samim time apsorbiraju vodu i povećavaju vlagu u betonu što pogoduje razvoju karbonatizacije, što dovodi do zaključka da je karbonatizacija kod laganih betona veća nego kod običnih betona.[3] Lagani betoni visokih čvrstoća imaju gustu strukturu pa im je propusnost smanjena te su zbog toga dubina karbonatizacije i korozija armature smanjene.[3] Povećanjem zaštitnog sloja moguće je smanjiti karbonatizaciju.[3]

### 5.2.2 Požarna otpornost

Ponašanje materijala pri izloženosti visokim požarnim temperaturama od velikog je značaja, a beton se pokazao kao vrlo dobar materijal pri povišenim temperaturama jer je anorganski materijal koji pri gorenju ne ispušta otrovne plinove, slabi je vodič toplote i ima relativno velik specifični toplinski kapacitet (oko 1000 J/kgK) što omogućuje primjenu betona kao zaštitnog materijala za materijale koji nepovoljno reagiraju na požar, kao što je čelik.[1] Pri djelovanju požara u betonu može doći do eksplozivnog raspucavanja što može prouzročiti nestanak zaštitnog sloja i direktnu izloženost armaturnih šipki vatri.[1,3] Požarna otpornost ovisi o strukturi pora u betonu i toplinskim svojstvima agregata korištenog za proizvodnju betona.

Provedena su ispitivanja požarne otpornosti na 4 vrste betona u pećima:

1. na laganom betonu gustoće od 1100 do 1200 kg/m<sup>3</sup> s ekspanđiranom glinom kao agregatom,
2. na konstruktivnom laganom betonu gustoće 1650 kg/m<sup>3</sup> s tlačnom čvrstoćom od 35 MPa,
3. na konstruktivnom laganom betonu s kemijskim dodatcima i
4. na laganom betonu visoke čvrstoće s dodatkom silicijske prašine.[3]

Rezultati su uspoređeni s običnim betonom koji je sadržavao dodatak polimernih vlakana. Požarni test proveden je na pločama običnog betona i laganog betona debljine 2.5 cm, ploči laganog betona debljine 5.0 cm i na gredi laganog armiranog betona debljine 15 cm.[3] Uzorci su proizvedeni u laboratorijskim uvjetima, na 20°C s relativnom vlažnosti 40%. Za zagrijavanje uzoraka korištena je plinsko-uljna peć, a zagrijavanje je provedeno kao jednostrano i obostrano.

Rezultati ispitivanja pokazali su da tanke ploče i običnog i laganog betona pri jednostranom zagrijavanju ne podliježu nikakvom pucanju.[3]

U betonu s dodatkom polimera nije se pojavljivalo pucanje čak ni nakon 30 minuta obostranog zagrijavanja. Na 5 cm debeloj ploči i gredi od laganog armiranog betona nakon sat vremena zagrijavanja, pri čemu je temperatura u sredini uzorka bila 850°C, nisu bila vidljiva nikakva oštećenja.[3] Smanjenje tlačne čvrstoće nakon izlaganja visokim temperaturama kod običnog betona veće je nego kod laganog betona (tablica 8).

Tablica 8 Preostale tlačne čvrstoće laganog i običnog betona nakon izlaganja visokim temperaturama [ $\text{N/mm}^2$ ] [3]

| Specifična težina | 0.75            | 1.3  | 1.7  | Normalna težina |
|-------------------|-----------------|------|------|-----------------|
| Temperatura °C    | Tlačne čvrstoće |      |      |                 |
| 22                | 15,8            | 27,8 | 28,5 | 31,7            |
| 518               | 12,9            | 25,9 | 25,5 | 29,6            |
| 704               | 11,9            | 21,5 | 23,1 | 27,1            |
| 843               | 8,4             | 13,5 | 16,6 | 19,1            |
| 92                | 7,3             | 11   | 11,8 | 12,8            |
| 1010              | 3,7             | 4,1  | 4,3  | 4,9             |
| 1052              | 3,1             | 3,2  | 2,9  | 3,2             |

Kod laganog betona visoke čvrstoće mortna matrica je gušća kako bi nadoknadila manje čvrstoće laganog agregata pa to rezultira težim kretanjem vlage kroz materijal što dovodi do štetnog utjecaja na požarnu otpornost. Takvu lošiju požarnu otpornost laganog betona visoke čvrstoće moguće je poboljšati dodavanjem superplastifikatora i aeranta koji smanjuju pucanje betona pri visokim temperaturama.[3] Kod laganog betona visoke kvalitete, ekspanzirani škriljevac i silikatni agregat sprječavaju skupljanje cementne paste pri zagrijavanju na temperaturu višu od 300°C. Razlog tomu je kad se ta dva agregata koriste u kombinaciji, oni se manje šire, pa samim time uzrokuju i manje širenje betona i smanjuju gubitak tlačne čvrstoće betona nakon izlaganja visokim temperaturama.[3]

Osim strukture pora i toplinskim svojstvima agregata, požarna otpornost ovisi i o količini i raspodjeli vlage u betonu. Količina vlage ovisi o vremenu sušenja i relativnoj vlažnosti okoline u kojoj se nalazi beton. Porozna struktura laganih betona uzrokuje brže sušenje i transport pare tijekom požara, što sprječava nakupljanje pare i samim time povećava požarnu otpornost.[3]

### 5.2.3 Otpornost na smrzavanje i odmrzavanje

Pri temperaturama ispod 0°C voda se smrzava i prelazi u led, a zatim kad prijede temperaturu od 0°C prelazi u tekuće stanje te se pri tome mijenja volumen betona jer se kod prelaska vode u led njen volumen povećava.[3] Takvi ciklusi smrzavanja i odmrzavanja smanjuju kvalitetu betona.

Mau i Ayuta koristili su lagani agregat perlit pri provođenju ispitivanja utjecaja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja na lagani beton.[17,18] Korišteni su uzorci prizme veličine 100 x 100 x 400 mm. Nakon 300 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja došlo je do smanjenja dinamičkog modula elastičnosti, a sve to je rezultat rasporeda pora laganog agregata.[17]

Kan i Demirboga proveli su istraživanje utjecaja ekspandiranog polistirena kao agregata na otpornost smrzavanja i odmrzavanja.[17,19] Smanjivali su postotak običnog agregata za 25%, 50%, 75% i 100%. Tlačna čvrstoća nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja smanjila se na 67%. Nakon 300 ciklusa primijećena je veća otpornost na smrzavanje, a to se pripisuje poroznosti ekspandiranog polistirena.

Zaključak tih istraživanja je da se povećanjem količine laganog agregata i broja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, pogoršavaju svojstva betona.[17]

## 6 PROIZVODNJA LAGANIH BETONA

Proizvodnja laganog betona u posljednje vrijeme se širi i razvija, pa je tako trenutno moguće proizvesti lagani beton od jednakoznatog agregata male volumenske mase pa i konstruktivni beton volumenskih masa od 1000 do 2000 kg/m<sup>3</sup> i tlačnih čvrstoća čak i do 80 MPa. Proizvodnja većinom ovisi o dostupnosti potrebnog laganog agregata. Proizvodnja betona sastoji se od dopremanja i skladištenja sastojaka, ispitivanja određenih svojstava sastojaka u laboratoriju, doziranja, miješanja, ispitivanja osnovnih svojstava svježeg betona i uzimanja uzoraka za ispitivanje svojstava u očvrslom stanju, transportiranja do mjesta ugradnje, ugradnje i zbijanja te završne obrade površine.[1]

Prije proizvodnje potrebno je znati kakvu sposobnost apsorpcije vode ima lagani agregat koji se namjerava koristiti jer apsorpcija vode utječe na ponašanje betona u svježem i očvrslom stanju. Uz to, potrebno je odrediti volumensku masu, stanje vlažnosti i granulometrijski sastav agregata.[3] Ponekad je neophodno provesti analizu vezano uz sadržaj sumpora i klorida u agregatu. Ukoliko je lagani agregat umjetni, on je propisane kvalitete pa je lakše i jednostavnije određivanje traženih svojstava. Stanje vlažnosti dopremljenog agregata ovisi o tome koliko je dugo skladišten i u kakvim uvjetima. Kako bi se spriječila apsorpcija vode potrebno je od proizvođača zatražiti dopremanje vlažnog agregata ili je agregat prije spravljanja betona potrebno močiti ili je potrebno primijeniti dodatke u mješavini.[8] Najčešći postupak močenja agregata je močenje u miješalici na početku miješanja, a koristi se jer agregat u prvi par minuta močenja apsorbira većinu vode. Volumen laganog agregata u betonskoj mješavini dobije se na temelju gustoće zrna agregata i volumenske mase koja se mjeri nakon dopremanja agregata i jednom dnevno tijekom proizvodnje. Ukoliko se volumenska masa i stanje vlažnosti ne mjere to može negativno utjecati na čvrstoću, obradivost i volumen betonske mješavine.

Miješanje betonske mješavine laganog betona duže je nego kod normalnog betona, a provodi se u jednakim miješalicama. Alternativna metoda miješanja odvija se u dvije faze i pogodna je za konstruktivne lagane betone malih gustoća. U prvoj fazi miješa se mort tj. dodaje se cement, pijesak, dodatci i 2/3 potrebne vode. U drugoj fazi dodaje se grubi agregat i preostala voda. Ovakvom metodom miješanja dobiva se beton dobre homogenosti i visoke kvalitete. Ukoliko je nakon miješanja dobivena kruća konzistencija, moguće je dodati vodu u svježju betonsku mješavinu, ali se to mora odvijati uz strogi nadzor.

Dobivena količina betonske mješavine može se razlikovati od količine koja je dobivena proračunom, a razlog tome su uglavnom varijacije volumenske mase laganog agregata. U zimskim danima prilikom miješanja, ponekad je potrebno povećati temperaturu svježe betonske mješavine kako ne bi došlo do njenog smrzavanja.

Transport laganog betona iz betonare vrši se jednako kao i transport običnog betona. Jedino na što treba obraditi pozornost je mogućnost smanjene obradivosti uslijed spomenute apsorpcije vode, segregacije mješavine i smanjenje homogenosti, a te probleme moguće je riješiti povremenim miješanjem tijekom transporta u automiješalici.

Kod ugradnje pumpom za beton, pumpa pritišće vodu u poroznu strukturu laganog agregata pa je potrebno u mješavinu dodati dodatak koji će smanjiti kretanje vode i time poboljšati obradivost takvog laganog betona.[3] Nakon ugradnje, vrši se zbijanje betona kako bi se zahvaćeni zrak eliminirao iz betonske mješavine. Zbijanje se kao i kod običnog betona većinom vrši pervibratorom, a jedina razlika je da lagani beton zahtijeva kraće vrijeme zbijanja.[3] Na kraju se izvodi završna obrada površine i njega kako bi se izbjegle pukotine na površini betona.



U tablici 9 prikazani su neki primjeri sastava betona, odnosno udjeli komponenata u laganom betonu, vodocementni omjer, udio zraka i tlačne čvrstoće nakon 28 dana.

Tablica 9 Primjer sastava laganih betona

|                               | Mjerne jedinice   | Stovset (Johnsen et al., 1995) | Nordhordland (Heimdal & Ronnenberg, 1995.) | Sandhornoya Bridge (Fergestad, 1996) | Hibernia (Hoff et. al., 1995) |
|-------------------------------|-------------------|--------------------------------|--|--------------------------------------|-------------------------------|
| Cement                        | kg/m <sup>3</sup> | 55                             | 50   | 55                                   | 69                            |
| Silicijska prašina            | kg/m <sup>3</sup> | 425                            | 430  | 400                                  | -                             |
| Leteći pepeo                  | kg/m <sup>3</sup> | 30                             | 35   | 25                                   | -                             |
| Ekspandirana glina            | kg/m <sup>3</sup> | 685                            | 630  | 575                                  | -                             |
| v/c omjer                     |                   | 520                            | 570  | 650                                  | -                             |
| Volumenska masa               | kg/m <sup>3</sup> | 0.35                           | 0.35                                       | 0.35                                 | 0.33                          |
| Slijeganje                    | mm                | 200                            | 200  | 200                                  | 210                           |
| Udio zraka                    | %                 | 5                              | -  | -                                    | 2.1                           |
| Tlačna čvrstoća nakon 28 dana | MPa               | 64.5                           | -  | 59.8                                 | 79.9                          |
| Vlačno naprezanje             | MPa               | -                              | -  | -                                    | 5.87                          |
| Modul elastičnosti            | GPa               | 22                             | 21   | -                                    | 30.5                          |
| Uzorak za tlačnu čvrstoću     |                   | Kocka                          | Kocka                                      | Kocka                                | Valjak                        |

## 7 PRIMJENA LAGANIH BETONA

### 7.1 Primjena laganih betona u visokogradnji

Prije odluke o upotrebi laganog betona u građenju konstrukcije i njenih dijelova, najprije se razmatra utjecaj njegovih svojstava na građevinu i njegova ekonomska isplativost.[11] Potrebno je znati da ponekad zamjenom običnog betona s laganim betonom nije moguće postići jednaka tražena svojstva koja bi se dobila korištenjem običnog betona te bi samim time to rezultiralo lošom konstrukcijom. Tijekom godina inženjeri su izbjegavali korištenje takvog betona pri izradi zgrada jer su smatrali da bi on zbog svoje mikrostrukture mogao biti propusniji i smanjene trajnosti, no nakon pregleda postojećih građevina i provedenih istraživanja došlo se do zaključka da nema smanjena trajnosti ni povećanja propusnosti kod dijelova izrađenih od laganog betona.[11]

Glavne prednosti laganog betona posebno su primjenjive kod konstrukcija srednjih i dugačkih raspona gdje je vlastita težina dominantna i gdje je zbog uvjeta tla nužno da vlastita težina bude što manja. Kod visokih građevina, lagani beton se često primjenjuje u izgradnji podnih ploča, ponekad cijelih horizontalnih konstrukcija, a ponekad samo nekih njenih elemenata.[11] U muzeju Guggenheim u Španolskoj koristio se lagani beton za izgradnju podnih ploča kako bi se smanjila vlastita težina konstrukcije zbog loših uvjeta tla. Koristio se lagani beton LC25 sa agregatom od ekspanzirane gline i time smanjila težina za oko 30%.[22] Također je korišten i ARLITA F-5, posebni lagani sastojak volumenske mase  $550 \text{ kg/m}^3$  i veličinom zrna od 3 do 8 mm.[22]

Zbog toplinskih svojstava laganog betona, on se primjenjuje za izradu vanjskih zidova i obloga kod kojih je potrebna završna obrada i izvana i iznutra, a da se pritom ne upotrebljava nekakav drugi dodatni oblik izolacije. Iako se upotrebom laganog betona javlja prednost smanjenja vlastite težine konstrukcije, a time i zahtjeva prednapinjanja, njegova primjena nalazi na ograničenju zbog potrebne veće količine čelika kako bi se nadoknadilo veliko skupljanje i puzanje, a ponekad i zbog nedostatka iskustva u projektiranju i građenju konstrukcija takvim betonom.

U Norveškoj u crkvi Snaroya lagani beton se koristio za izradu stropnih ploča i zidova zbog dobrih toplinsko-izolacijskih svojstava i smanjene vlastite težine.[22] U tablicama 10 i 11 dani su podatci o sastavu betona korištenog za izradu zidova, odnosno za izradu stropnih ploča.[22]

Tablica 10 Lagani beton za zidove [22]

| Lagani beton za zidove               |                        |
|--------------------------------------|------------------------|
| Leca (ekspandirana glina) 3-10<br>mm | 770 kg/m <sup>3</sup>  |
| Pijesak                              | 630 kg/m <sup>3</sup>  |
| Cement                               | 420 kg/m <sup>3</sup>  |
| Volumenska masa                      | 1420 kg/m <sup>3</sup> |
| Tlačna čvrstoća                      | 20 MPa                 |

Tablica 11 Lagani beton za stropne ploče [22]

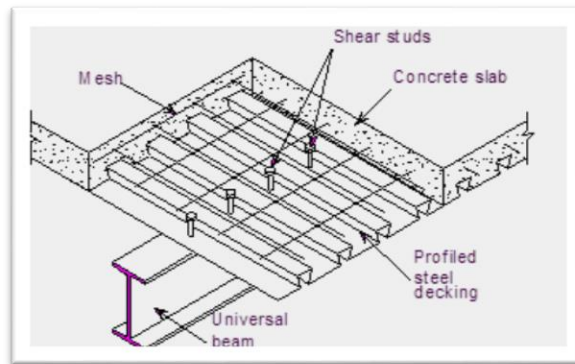
| Lagani beton za stropne ploče        |                               |
|--------------------------------------|-------------------------------|
| Leca (ekspandirana glina) 3-10<br>mm | 700 kg/m <sup>3</sup>         |
| Pijesak                              | 680 kg/m <sup>3</sup>         |
| Cement                               | 450 kg/m <sup>3</sup>         |
| Volumenska masa                      | 1550 - 1650 kg/m <sup>3</sup> |
| Tlačna čvrstoća                      | 25 MPa                        |

Kod 252 m visokog korporativnog centra Nationsbank u SAD-u lagani beton korišten je kod podnih ploča debljine 12 cm koje su poduprte sa 45 cm debelim gredama izrađenim od naknadnog prednapetog običnog betona.[23] Razlog korištenja osim smanjenja težine bio je i zahtjev za otpornost na požar u duljini od 3 sata.[23] Sastav laganog betona korištenog kod te građevine dan je u tablici 12.

Tablica 12 Lagani beton u korporativnom centru Nationsbank [22]

|                         |                        |
|-------------------------|------------------------|
| CEM III                 | 385 kg/m <sup>3</sup>  |
| Leteći pepeo            | 83 kg/m <sup>3</sup>   |
| Ekspandirani škriljevac | 534 kg/m <sup>3</sup>  |
| Pijesak                 | 765 kg/m <sup>3</sup>  |
| Voda                    | 175 kg/m <sup>3</sup>  |
| Plastifikatori          | 1.5 kg/m <sup>3</sup>  |
| Superplastifikatori     | 4 kg/m <sup>3</sup>    |
| Tlačna čvrstoća         | 47 MPa                 |
| Vlačna čvrstoća         | 3.7 MPa                |
| Modul elastičnosti      | 25 GPa                 |
| Volumenska masa         | 1890 kg/m <sup>3</sup> |
| Slijeganje              | 20 cm                  |

Još jedna od primjena javlja se u izradi kompozitnih ploča s profiliranim metalnim podom kod kojih je većine upotrijebljena je tanka ploča od laganog betona koja djeluje kompozitno s metalnim podom povezanim s gredama poda pomoću klinova za smicanje (slika 19).[11] Pozitivni učinci korištenja laganog betona u takvim konstrukcijama su ušteda u strukturi okvira, bolja izolacijska svojstva smanjenjem toplinske provodljivosti za 50% te smanjenje pojave pukotina uslijed skupljanja što omogućuje kontinuiranu izvedbu velikih dijelova ploče.[11]



Slika 19 Kompozitna ploča s profiliranim metalnim podom [20]

Upotrebom laganog betona u proizvodnji predgotovljenih elemenata olakšava se transport i podizanje velikih dijelova bez potrebe za težom mehanizacijom, a i rukovanje takvim elementim na gradilištu je jednostavnije. Najčešće se proizvode predgotovljeni zidovi (slika 20), a ukoliko će zidovi u građevini biti vanjski, preporuča se korištenje perlita, granulirane troske visokih peći i prirodnih poroznih agregata kao grubog agregata te perlitnog pijeska i letećeg pepela kao finog agregata.[11] Elementi mogu biti i do 20% lakši od istih elemenata proizvedenih od običnog betona, a da pritom osiguravaju jednaku razinu čvrstoće.[11]



Slika 20 Predgotovljeni zidni element od laganog betona [8]

Proizvode se i velike armirane zidne ploče za industrijske zgrade. Takav tip konstrukcije lakši je za rad 30-40% u odnosu na klasičnu gradnju opekom i zahtijeva mnogo manje čeličnog pričvršćenja. Koristi se klasična i prednapeta armatura te različite vrste laganog agregata kojima volumenska masa varira od 900 do 1200 kg/m<sup>3</sup>. [11] Osim zidnih i podnih ploča te predgotovljenih elemenata, izrađuju se i betonski blokovi koristeći različite lagane agregate što rezultira blokovima različitih čvrstoća i toplinske i zvučne izolacije, a pri tome se štedi na vremenu i troškovima zbog smanjena vlastite težine.[11] Proizvedeni blokovi mogu imati tlačnu čvrstoću od 2.8, 3.5 i 7.0 N/mm<sup>2</sup>, a mogu se koristiti i za unutarne i za vanjske zidove, ali je upotreba za vanjske zidove ograničena zbog male savojne čvrstoće.[11]

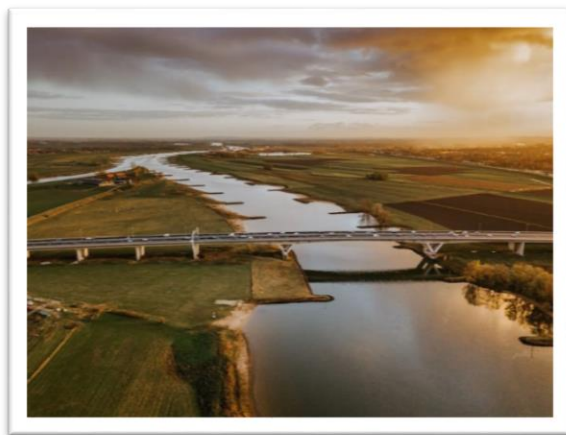
Primjena laganog betona moguća je i kod obnove ili preuređenja u vidu zamjene ili dodavanja katova u postojećim konstrukcijama bez potrebe za pojačanjem temelja.

Uz to, korištenjem laganog betona može se povećati seizmička otpornost podova jer lagani beton ima veću otpornost i manju frekvenciju vibracije od običnog betona.[11]

## 7.2 Primjena laganih betona kod mostova

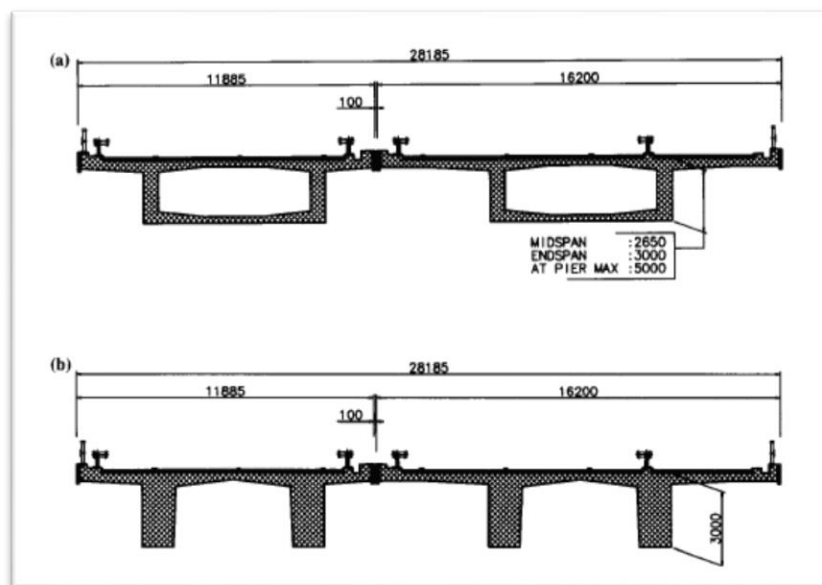
Već dugi niz godina lagani beton koristi se za izradu mostova ili za poboljšanje postojećih mostova. Iako je lagani beton skuplji od običnog betona zbog veće cijene laganog agregata u odnosu na šljunak ili drobljeni kamen i zbog potrebne veće količine cementa, prednost smanjenja vlastite težine ipak rezultira upotrebom laganog betona u konstrukciji mostova. Vlastita težina mostova čini oko 70% opterećenja, pa se teži što većem mogućem smanjenju takvog opterećenja. Korištenjem Lytaga, odnosno usitnjenog letećeg pepela, u konstrukcijama mostova, oko 15% ukupnog opterećenja mosta je eliminirano, korištenjem agregata Liapora, tj. agregata škriljevca, oko 20%, a samim time je smanjena i potrebna armatura i lakši su zahtjevi temeljenja.[11] Javlja se i prednost lakšeg rukovanja i transporta predgotovljenih nosača i ploča pa se mogu koristiti kranovi manje nosivosti. Nedostatak laganog betona je pojava pukotina čije širenje manja zrna agregata ne mogu spriječiti pa ponekad može doći i do odlamanja dijelova betona, ali se to može izbjeći ugradnjom manje količine dodatne armature.[11]

Jedan od primjera mosta sagrađenog od laganog betona je most Andrej Sacharov preko rijeke Rajne u blizini grada Arnhema u Nizozemskoj, slika 21. Izgradnja tog mosta započela je 1985. godine, a sredinom 1988. godine otvoren je za promet. Središnji rasponi građeni su metodom slobodne konzolne gradnje, a ostali dijelovi monolitnom gradnjom.[11]



Slika 21 Most Andrej Sacharov [21]

Most ima dvije vrste poprečnog presjeka, sandučasti i T presjek (slika 22). Nakon istraživanja pri projektiranju mosta odlučeno je da će biti izgrađen od laganog betona sa Lytagom, odnosno raspršenim letećim pepelom kao agregatom. Koristeći lagani beton postigla se ušteda oko 200 tona čelika, 2000 m dužine pilota po fazama kao i ušteda od 50 000£ po fazi.[11]



Slika 22 Poprečni presjeci mosta Andrej Sacharov [11]

### 7.3 Primjena laganih betona za specijalne konstrukcije

Specijalne konstrukcije koje koriste lagani beton dijele se u dvije grupe: morske konstrukcije te konstrukcije na kopnu.[11] Za obje skupine građevina uglavnom se koristi prednapeti lagani beton. Kod projektiranja specijalnih građevina visoke tehnologije bitno je da, osim što pružaju otpor na normalna gravitacijska opterećenja, pružaju i otpor na prirodne, toplinske i okolišne uvjete u kojima se nalaze.[11]

Kad su u pitanju morske konstrukcije, lagani beton koristi se još od Prvog svjetskog rata kad je bilo potrebno uštedjeti na količini čelika koji je bio potreban u vojne svrhe pa su građeni brodovi od laganog betona. Pomorski inženjeri u to vrijeme došli su do zaključka da bi brod bio upotrebljiv ako bi čvrstoća betona bila iznad  $35 \text{ N/mm}^2$ , a volumenska masa ispod  $1760 \text{ kg/m}^3$ .

Takav zahtjev volumenske mase nije bilo moguće postići s običnim agregatom, pa su proizveli umjetni lagani agregat, ekspanzirani škriljevac proizveden u rotacijskim pećima koji je inertan, čvrst, izdržljiv te je njime moguće bilo dosegnuti čvrstoću betona iznad  $35 \text{ N/mm}^2$ , a da se pritom ne prijede zahtijevana volumenska masa. Niska razina propusnosti prenapetog laganog betona visokih čvrstoća povećava trajnost konstrukcija izgrađenih od takvog materijala, a to je posebno bitno kod morskih konstrukcija gdje je nepropusnost važan faktor. Lagani beton se također koristi i u izgradnji naftnih platforma u Sjevernom moru (slika 23), a pri tome takav beton mora biti tlačnih čvrstoća većih od  $40 \text{ N/mm}^2$  te otporan na mraz i djelovanje soli kako ne bi došlo do korozije armature i trajnog oštećenja betonske strukture.[8,11]

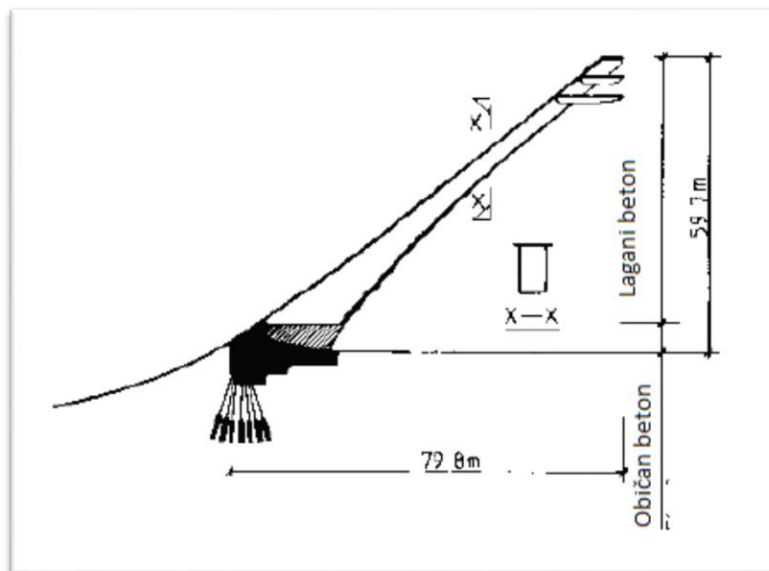


Slika 23 Naftna platforma [8]

U zadnja tri desetljeća lagani beton koristi se za izradu pojedinih elemenata specijalnih konstrukcija na kopnu kao što su tribine, stadioni i parkirališta. Takav beton se većinom upotrebljava zbog svoje male volumenske mase, velike otpornosti na požar i dobrih izolacijskih i toplinskih svojstava.

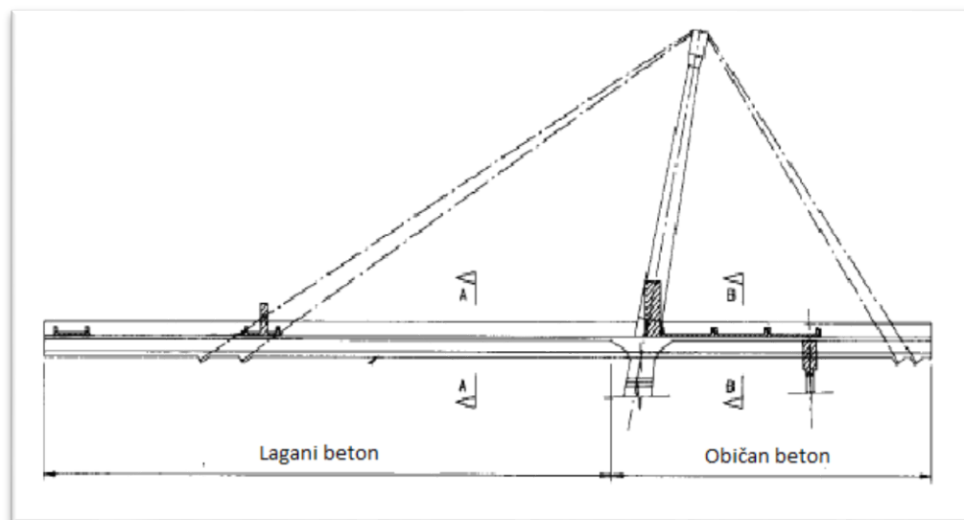
Cjelokupni gornji ustroj platforme za skijaške skokove u Njemačkoj u Oberstdorfu sandučastog je presjeka izgrađenog od laganog betona naknadno prenapetog šipkama za prenapinjanje, dok je donji ustroj izgrađen od običnog betona (slika 24).[11] Agregat koji je korišten za izradu laganog betona bila je ekspanzirana glina, a takvim korištenjem postignuta je karakteristična 28-dnevna tlačna čvrstoća betona od  $45 \text{ N/mm}^2$  i volumenska masa od  $1750 \text{ kg/m}^3$ . [16] Upotrebom laganog betona uštedjelo se na sidrima, kablovima za prenapinjanje, a samim time i smanjena je i cijena cjelokupne konstrukcije.[11]





Slika 24 Shematski prikaz platforme za skijaške skokove u Oberstdorfu [11]

U konstrukciji krova južne tribine Rugby Football Union Grounda u Twickenhamu u Ujedinjenom Kraljevstvu korišten je lagani beton. Prednapete krovne grede ovješene su na pilone pomoću užadi od nehrđajućeg čelika. Prednjih 23 m grede izrađene su koristeći lagani beton s Lytagom kao agregatom, dok je zadnjih 12 m izvedeno kao puni presjek od običnog betona kako bi djelovao kao protutupeg (slika 25).[11]



Slika 25 Poprečni presjek južne tribine stadiona Rugby Football Union Grounda u Twickenhamu [11]

## 8 LAGANI BETON PROIZVEDEN OD BIOMATERIJALA

Korištenjem biomaterijala kao zamjenu za prirodne agregate u kompozitima na bazi cementa i vapna, moguće je smanjiti utjecaj građevinske industrije na okoliš.[23]

Primjer agregata biološkog podrijetla je grana konoplje, dobivena kao nusproizvod prerade konoplje i prikazana je na slici 26. Zbog porozne strukture, agregat od konoplje je lagan, ima dobra akustična i toplinsko-izolacijska svojstva i visoku sposobnost uklanjanja ugljikovog dioksida.[23]



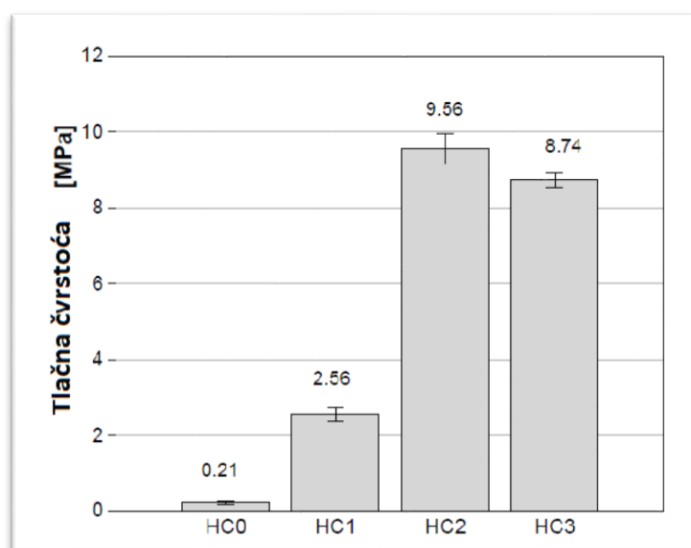
Slika 26 Grane konoplje [23]

Najrašireniji tip takvog betona je od konoplje i vapna. Čestice konoplje duljine su od 5 do 40 mm.[22] Takav beton ima toplinsku provodljivost od 0,08 do 0,16 W/mK pa je dobar izolator. Volumenska masa betona iznosi od 300 do 670 kg/m<sup>3</sup>, ali mu je tlačna čvrstoća mala. Tlačna čvrstoća ne prelazi 2 MPa, a kako bi se postigla tlačna čvrstoća do 10 MPa potrebna je velika količina veziva, čak i do 700 kg/m<sup>3</sup>. Korištenje takvog agregata zahtijeva zaštitu od bakterija i gljivica, a to je moguće postići korištenjem vapna kao veziva.

Provedeno je istraživanje kojim se htio postići beton od konoplje tlačne čvrstoće blizu tlačne čvrstoće laganog betona razreda LC8/9.[23] Koristila su se dva veziva: portland cement i hidratizirano vapno. S cementnim vezivom korištena je i otopina natrijeva trisilikata kako bi mineralizirala agregat od konoplje.

Korištene čestice konoplje bile su veličine od 0,5 do 16 mm dobivene iz industrije konoplje u Poljskoj.[23] Takve čestice upotrijebljene su nakon sušenja, uklanjanja prašine i prosijavanja. Prosječna volumenska masa čestica bila je  $98 \text{ kg/m}^3$ . [23]

HC0 koristila se kao referentna betonska mješavina. HC1 betonska mješavina sadržavala je samo vapno kao vezivo, HC2 je imala 40% vapna i 60% cementa, a HC3 samo cement kao vezivo. U sve mješavine dodan je superplastifikator kako bi poboljšao obradivost.[23] Tlačne čvrstoće mjerene su na suhim uzorcima kocki dimenzija  $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$  28 dana nakon proizvodnje, a dobiveni rezultati prikazani su na slici 27.



Slika 27 Dobivene tlačne čvrstoće nakon 28 dana [23]

Povećanjem količine veziva cement-vapno bilo je moguće postići tlačnu čvrstoću sličnu onoj kod laganog betona razreda LC8/9. Negativni utjecaj povećanja količine vapna i cementa je smanjenje toplinsko-izolacijskih svojstava jer se takvim povećanjem količine povećala i toplinska vodljivost betona.[23] Došlo se i do zaključka da je vapno najbolji mineralizator jer su mikrobiološka ispitivanja na ovim uzorcima potvrdila da se njegovim korištenjem povećava antimikrobna aktivnost betona. [23]

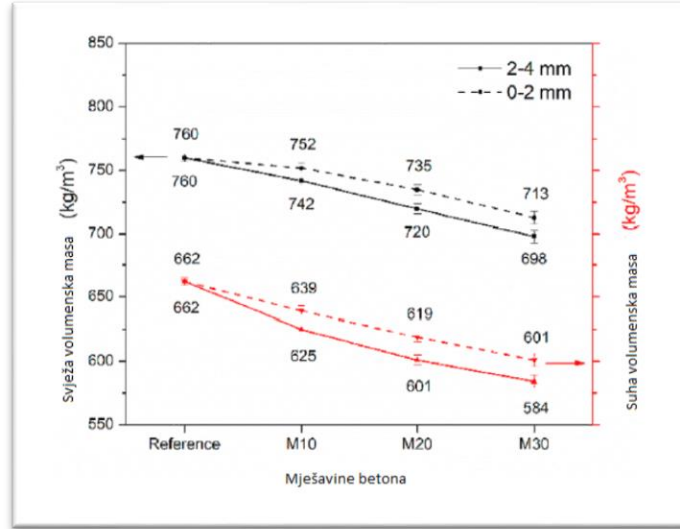
Još jedan od materijala korištenih za poboljšanje zvučne i toplinske izolacije betona su vlakna miskantusa.[24] Vlakna miskantusa su jedna vrsta biomase dobivena od biljke miskantusa koja zbog porozne, savitljive strukture i vlaknastog oblika bolje disipiraju zvuk.

Takav beton prikladan je za korištenje kod unutarnjih stropnih ploča i pregradnih zidova pri čemu uzrokuje uštedu energije i bolje uvjete življenja. Provedeno je istraživanje kojim se htio postići ultra lagani beton korištenjem takvih vlakana. Korištena su vlakna veličine 0-2 mm i 2-4 mm i prikazana su na slici 28.



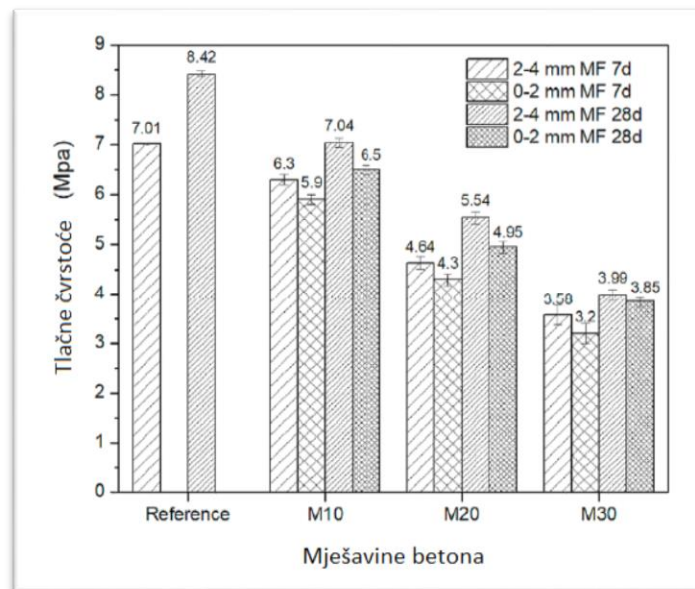
Slika 28 Vlakna miskantusa veličina 0-2 mm (lijevo) i 2-4 mm (desno) korištena u istraživanju [24]

U tom istraživanju kao lagani agregat korišteno je ekspanzirano staklo dobiveno posebnim postupkom od recikliranog stakla, a veličine čestica takvog agregata kretale su se od 0,25 do 8 mm.[24] Vezivo upotrijebljeno je CEM III te su također dodani superplastifikator za poboljšanje obradivosti te aeranta koji je dodatno smanjio volumensku masu takvog betona. Betonske mješavine M10, M20 i M30 nastale su smanjenjem količine ekspaniranog stakla za 10%, 20% i 30% i zamjenom sa vlaknima miskantusa.[24] Dobivene volumenske mase bile su manje od 800 kg/m<sup>3</sup> što takav beton svrstava u grupu ultra laganih betona. Na slici 29 vidljivo je da se povećanjem količine vlakana miskantusa volumenska masa betona sve više smanjivala, a razlog tomu je porozna struktura tih vlakana.



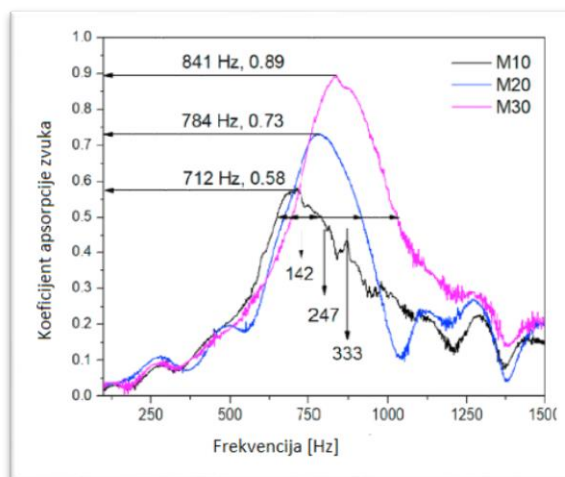
Slika 29 Volumenske mase betonskih mješavina M10, M20 i M30 korištenih u istraživanju [24]

Kad je riječ o tlačnim čvrstoćama, one su prikazane na slici 30, a iz slike je lako zaključiti da se i tlačne čvrstoće smanjuju povećanjem udjela vlakana. Negativan efekt koji vlakna ostavljaju na tlačnu čvrstoću javlja se iz razloga jer čvrstoća betona u velikoj mjeri ovisi o čvrstoći agregata koja je veća kod ekspaniranog stakla nego kod vlakana miskantusa, pa se smanjenjem udjela ekspaniranog stakla smanjuje i čvrstoća cjelokupne betonske mješavine.[24]



Slika 30 Tlačne čvrstoće betonskih mješavina M10, M20 i M30 korištenih u istraživanju [24]

Apsorpcija zvuka najveća je kod betonske mješavine M30 koja sadrži veće količine vlakana miskantusa veličine 2-4 mm, a to je vidljivo na slici 31. Razlog bolje apsorpcije zvuka kod vlakana u odnosu na ekspanzirano staklo je struktura vlakana koja posjeduje veliku količinu međusobno povezanih pora što rezultira boljom disipacijom zvuka. [24]



Slika 31 Apsorpcija zvuka betonskih mješavina M10, M20 i M30 korištenih u istraživanju [24]

Zbog ograničenih količina konoplje za proizvodnju laganog betona od biomaterijala, na jugu Francuske provedeno je ispitivanje kore kukuruza i suncokreta, primarno zbog njihove velike dostupnosti, kao alternativnih biomaterijala za proizvodnju takvog betona.[25] Na slici 32 uspoređeni su veličine čestica agregata od konoplje, kukuruza i suncokreta.[25]



Slika 32 Veličine čestica agregata: A(konoplje), B(kukuruz), C(suncokret) [25]

Dijelovi kukuruza pokazali su ograničenu sposobnost upijanja vode. Štetan utjecaj kukuruza na proces vezivanja i očvršćivanja pucolanskog veziva samim time bi imao i negativan utjecaj na mehanička svojstva takvog betona pa se ne preporuča njegova primjena kao biomaterijala.[25] S druge strane, čestice suncokreta pokazale su slična svojstva onima od čestica konoplje, a njihov utjecaj na procese vezivanja i očvršćivanja veziva je zanemariv, pa se čestice suncokreta čine kao dobra alternativa za korištenje pri nedostatku konoplja.

## 9 ZAKLJUČAK

Smanjenje vlastite težine korištenjem laganog betona najveća je njegova prednost jer se takvom upotrebom smanjuje stalno opterećenje na konstrukciju i njezine dijelove. To smanjenje vlastite težine postiže se upotrebom laganog agregata porozne strukture koji posjeduje malu volumensku masu, pa je samim time manja i volumenska masa betonske mješavine. Zbog povećane poroznosti strukture, lagani betoni posjeduju manju čvrstoću i otpornost na habanje pa to ponekad rezultira izbjegavanjem upotrebe takvog betona za izradu konstruktivnih dijelova. Još jedna prednost laganog betona je njegova mala toplinska vodljivost koja ga čini vrlo dobrim izolatorom topline i zvuka. Kad se govori o trajnosti, ona je u većini slučajeva jednaka kao i od običnih betona. Lagani betoni imaju manji modul elastičnosti u odnosu na obične betone što dovodi do činjenice da su krtiji i da se ponašaju skoro potpuno elastično do samog sloma. Nedostatci laganog betona koji ponekad mogu imati značajnu ulogu su veliko skupljanje, bubrenje i puzanje, no ukoliko se u betonskoj mješavini primjene dodatci, ti nedostatci se mogu regulirati.

Kad je riječ o troškovima izrade i rukovanja, oni su manji kod predgotovljenih elemenata od takvog betona u odnosu na predgotovljene elemente od običnog betona jer su lakši pa je i potrebna mehanizacija za dizanje i transport manje nosivosti, ali su zato troškovi izrade veći zbog potrebne veće količine cementa i zahtijevaju više pažnje pri miješanju s ciljem postizanja potrebne kakvoće. Lagani beton primjenjuje se kod dijelova konstrukcija visokogradnje kao što su zidovi ili stropne ploče. Lagani beton koristi se i kod mostova zbog smanjenja težine koja kod mostova čini većinu opterećenja. Uz to, lagani beton se upotrebljava i kod specijalnih konstrukcija kao što su naftne platforme, krovne konstrukcije tribina ili platforme za skijaške skokove.

Zbog velikog negativnog utjecaja na okoliš pri proizvodnji betona, poseže se za korištenjem biomaterijala koji bi koliko-toliko smanjili taj negativan utjecaj. Biomaterijali koji se mogu koristiti kao agregati su vlakna konoplje, miskantusa ili čestice suncokreta.

Iako lagani beton posjeduje dobra svojstva, njegova primjena nije dostigla svoj maksimum jer ne postoji dovoljno istraživanja i izvedenih projekata koji bi potakli inženjere na njegovu veću primjenu. Razvoj tehnologija za njegovu proizvodnju u budućnosti vjerojatno će doprinijeti njegovoj češćoj upotrebi u različitim aspektima građevinarstva.



## 10 LITERATURA

- [1] Bjegović, D.; Štirmer, N.: *Teorija i tehnologija betona*, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, 2015.
- [2] Ukrainczyk, V.: *Beton, Struktura, Svojstva, Tehnologija*, Alcor, Zagreb 1994.
- [3] Chandra, S.; Berntsson, L.: *Lightweight Aggregate Concrete*, Noyes Publications: Norwich, New York, U.S.A., 2002.
- [4] Halmenstine, A. M., Ph. D.: „*What is Pumice Rock? Geology and Uses.*“ ThoughtCO, Feb. 17. 2021., [thoughtco.com/pumice-rock 4588534](https://thoughtco.com/pumice-rock-4588534) [Pristupljeno: 20.9.2023.]
- [5] Sandatlas-Scoria; <https://www.sandatlas.org/scoria/> [Pristupljeno:20.9.2023.]
- [6] Thienel, C.; Beuntner, N., Haller, T.: *Lightweight Concrete – From Basics To Inovations*, Article in Materials, 2020.
- [7] Bulletin 4: *Lightweight aggregate concrete: codes and standards*, State of art report, FIB 1999.
- [8] Predavanje: *Specijalni betoni I*, kolegij Osnove tehnologije betona, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 2022.
- [9] *How to Use Perlite to Improve Soil and Boost Plant Growth*; <https://www.gardenbetty.com/perlite/> [Posjećeno:20.9.2023.]
- [10] *How to Use Vermiculite*; <https://www.thespruce.com/how-to-use-vermiculite-5089699> [Posjećeno: 20.9.2023.]
- [11] Clarke, J.L.: *Structural Lightweight Aggregate Concrete*, Blackie Academic & Professional Publisher, Glasgow 2005.
- [12] *ISI Certification for Sintered Fly Ash Coarse Aggregate*; <https://m.indiamart.com/proddetail/isi-certification-for-sintered-fly-ash-coarse-aggregate-22206139962.html> [Posjećeno: 20.9.2023.]
- [13] *Troska iz visokih peći: primjena sastava*; <https://hourstrong.com/troska-iz-visokih-pei-primjena-sastava/> [Posjećeno: 20.9.2023.]
- [14] Mindess, S.: *Developments in the Foundation and Reinforcement of Concrete*, Second Edition, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, Canada 2019.
- [15] Newman, J.; Choo, B. S.: *Advanced Concrete Technology, Concrete Properties*, Elsevier Ltd. 2003., ISBN 0 7506 5104 0
- [16] *Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete*, ACI 213R-87, obnovljeno izdanje 1999.
- [17] Agrawal, Y.; Gupta, T.; Sharma, R.; Panwar, N. L.; Siddique, S.: *A Comprehensive Review on the Performance of Structural Lightweight Aggregate Concrete For Sustainable Construction*, Constr. Mater. 2021.

- [18] Mao, J.; Ayuta, K.: *Freeze-Thaw Resistance of Lightweight Aggregate Concrete and Aggregate at Different Freezing Rates*, J. Mater. Civ. Eng. 2008, 20, 78-84
- [19] Kan, A.; Demirboga, R.: *A novel material for lightweight concrete production*, Cem. Concr. Compos. 2009, 31, 489-495
- [20] *Design of composite steel deck floors for fire*; [https://www.steelconstruction.info/Design\\_of\\_composite\\_steel\\_deck\\_floors\\_for\\_fire](https://www.steelconstruction.info/Design_of_composite_steel_deck_floors_for_fire) [Posjećeno: 20.9.2023.]
- [21] *Motorways in the Netherlands*; <https://lasti24.com/motorways-in-the-netherlands/> [Posjećeno: 20.9.2023.]
- [22] FIB Bulletin 8: *Lightweight Aggregate Concrete*, Recommended extensions to Model Code 90, 2008.
- [23] Horszczaruk, E.; Strzalkowski, J; Glowacka, A.; Paszkiewicz, O.; Markowska-Szczupak, A.: *Investigations of Durability Properties for Lightweight Structural Concrete with Hemp Shives Instead of Aggregate*, Appl. Sci. 2023., 13, 8447
- [24] Chen, J.X.; Wu, F.; Qingliang, Yu; Brouwers, H. J. H.: *Bio-based ultra-lightweight concrete applying mischanthus fibers: Acoustic absorption and thermal insulation*, China, 2020.
- [25] Bourdot, A.; Magniont, C.; Lagouin, M.; Lambare, G.; Labonne, L.; Evon, P.: *Evaluation of the potential of corn and sunflower bark particles as bio-aggregates for lightweight concrete*, SynerCrete'18 International Conference on Interdisciplinary Approaches for Cement-based Materials and Structural Concrete, Funchal, Portugal 2018.