

Lagani betoni

Bošnjak, Mihael

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:237:170162>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-23**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET ZAGREB

ZAVRŠNI RAD

Lagani betoni

Mihael Bošnjak

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET ZAGREB**

ZAVRŠNI RAD

Lagani betoni

Mentor:

doc. dr. sc. Nikolina Vezilić Strmo

Student:

Mihael Bošnjak

Zagreb, 2023.



TEMA ZAVRŠNOG ISPITA

Ime i prezime studenta: **Mihael Bošnjak**

JMBAG: **0082063760**

Završni ispit iz predmeta: **Visokogradnje**

Naslov teme
završnog ispita:

HR	Lagani betoni
ENG	Lightweight concretes

Opis teme završnog ispita:

Rad se bavi istraživanjem primjene laganih betona u zgradarstvu. Istražuje se način korištenja materijala, tehnologija proizvodnje, karakteristična obilježja, način i uvjeti ugradnje i izvedbe. Teoretske postavke istraživanja dodatno se prezentiraju kroz analizu nekoliko izvedenih primjera.

Datum: **17.04.2023.**

Komentor:

(Ime i prezime komentora)

Mentor:

doc.dr.sc.Nikolina Vezilić Strmo

(Ime i prezime mentora)

Nezlić Strmo

(Potpis mentora)

Sažetak

Lagani betoni su inovativni materijal sa dugom povijesti, čiji razvoj još i danas traje. Ovaj rad prikazuje karakteristike laganih betona da bi znali kada ga je efikasno primijeniti. Prednosti laganih betona su smanjene težine, poboljšanih izolacijskih svojstava i povećane otpornosti na požar, ali te prednosti dolaze i sa svojim nedostacima poput smanjene čvrstoće i modula elastičnosti. Prikazane su vrste laganih betona (ćelijasti, lakoagregatni i jednakozrnati) te su objašnjenje prednosti i nedostaci svake vrste. Također su prikazani najčešći agregati koji se koriste za proizvodnju. Objašnjena je specifičnost proizvodnje laganih betona kao i postojeće formule koje se mogu koristiti za početno doziranje smjese. Također pogledali smo kako različiti standardi definiraju i reguliraju uporabu laganih betona, te smo spomenuli i neke nedostatke postojećih standarda. Za kraj smo prikazali par primjera zgrada gdje se lagani beton primjenjivao.

Ključne riječi:

Lagani betoni; LC; lagani agregati; LWA; proizvodnja; standardi; primjena;

Abstract

Lightweight concrete is an innovative material with rich historical background, whose development continues today. This paper aims to review characteristics of lightweight concrete so we could discern its optimal applications. Advantages of lightweight concrete is its reduced weight, increased insulating properties and increased fire resistance. There are different types of lightweight concrete (lightweight aggregate concrete, cellular concrete, and no fines concrete), each type exhibits distinctive production methods, as well as distinct advantages and disadvantages. Lightweight concrete also has a specific way of production, which differs from normal concrete, so we mentioned formulas which can be used for initial dosing of the mixture. This paper also sheds light on how different standards define and govern usage of lightweight concrete. Some limitations of standards are also mentioned. Finally, several exemplary architectural structures employing lightweight concrete as a building material are showcased within this study.

Key words:

lightweight concrete; LC; lightweight aggregate; LWA; production; standards; application

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Lagani betoni	2
2.1. Svojstva laganih betona.....	3
2.2. Podjela laganih betona	4
2.2.1. Lakoagregatni betoni	4
2.2.2. Lagani betoni od jednakozrnatog agregata	9
2.2.3. Čelijasti betoni	9
3. Internacionalni standardi.....	13
3.1. Internacionalni standardi za lagane agregate	13
3.2. Internacionalni standardi za lagane betone	14
4. Proizvodnja betona od laganog agregata	16
4.1. Ostali sastojci (materijali) za proizvodnju laganog betona	16
4.2. Spravljanje LC	17
4.3. Postavljanje i rukovanje LC	18
4.4. Doziranje sastojaka laganog betona	19
4.4.1. Uvod u studiju.....	20
4.4.2. Formuliranje jednadžbi za dizajn betona	21
4.4.3. Srednja tlačna čvrstoća	21
4.4.4. W/C omjer.....	22
4.4.5. Potrebna količina vode.....	22
4.4.6. Određivanje volumetrijskog odnosa (V_G) od krupnih agregata.....	23
4.4.7. Zaključak o studiji i nedostaci	25
5. Mikrostruktura laganog betona	26
5.1. Međudjelovanje između matrice i laganog agregata.....	26
5.2. Nosivost laganog betona	26
6. Faktor konverzije	29
6.1. Faktor konverzije oblika za lagani beton	29

6.2.	Faktori konverzije za različite uvjete stvrdnjavanja.....	31
7.	Primjeri primjene laganog betona.....	32
7.1.	Stambeni blok u Berlinu.....	32
7.2.	Obiteljska kuća napravljena od plinobetona	38
8.	Zaključak	43
9.	Literatura.....	44

1. UVOD

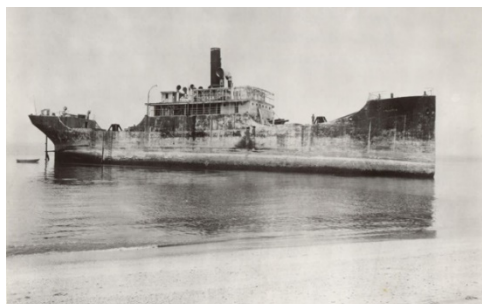
Lagani betoni nisu nastali kao jedan od modernih dostignuća, već je njihov nastanak započeo u Rimskom carstvu. Rimljani su prepoznali vrijednost betona kao materijala, te su za pripremu istoga koristili materijale iz svoje neposredne okoline. Za proizvodnju „Opus caementicium“ koristili su lagane agregate vulkanskog podrijetla. Jedan od najboljih primjera primjene laganog betona je kupola Panteona u Rimu koja je savršeno polukružna, te napravljena od jednog dijela promjera 43.5 metara. Svojstva tog materijala još uvijek impresioniraju inženjere i danas [1].

Nakon pada Rimskog carstva upotreba laganog agregata se smanjuje jer je bilo nestašice prirodnog vulkanskog agregata. Ponovna primjena, proizvodnja te razvoj laganog agregata započinje u 19-stom i 20-tom stoljeću [2].

Američka mornarica je bila prva koja je započela program primjenjivanja laganih agregata za proizvodnju brodova. Kao rezultat tog programa proizvedeno je 12 brodova sa lagano betonskim trupovima, od kojih je najpoznatiji „SS ATLANTUS“ napravljen 1918 godine. Ovaj uspjeh programa rezultirao je da je tijekom drugog svjetskog rata proizvedeno i pušteno u službu još 104 opskrbna broda [3].

Ovakav uspjeh u proizvodnji brodova potaknuo je korištenje laganog betona za konstrukcijske namjene. Iz tog se razloga u 19 stoljeću počinje eksperimentirati sa agregatom vulkanskog podrijetla, te otpadnim materijalima iz industrijske revolucije (zgura, šljaka...). Tijekom 20 stoljeća izgrađeno je preko 200 mostova od laganog betona [4], te nekoliko višekatnih visokih zgrada poput Prudential Plaza zgrade i Marina City tornjeva.

Danas se razvoj laganih betona nastavlja sa ciljem pravljenja materijala koji će imati i zadovoljavajuća nosiva svojstva i zadovoljavajuća izolacijska svojstva.



Slika 1 S. S. Atlantis [5]

2. LAGANI BETONI

Lagani betoni su betoni kojima je gustoća manja od 2000 kg/m^3 . To ih odvaja od običnih betona kojima je gustoća oko $2400 \text{ kg/m}^3 - 2500 \text{ kg/m}^3$, te spadaju u skupinu specijalnih betona. Do takvog smanjenja gustoće može se doći na više načina [6]:

- Stvaranjem međuprostora između krupnih zrna agregata
- Stvaranjem pora u mortu
- Upotrebom agregata sa velikim sadržajem pora

Smanjivanje gustoće betona će za sobom nositi i dobre i loše stvari. Neke od pozitivnih promjena biti će smanjenje težine betona što će se smanjiti vlastitu težinu konstrukcije, te će nam omogućiti bolja izolacijska svojstva. Međutim isto tako to će ujedno i smanjiti otpornost na habanje, čvrstoću betona, te su skuplji za proizvesti. Iz tih razloga potrebno je poznavati svojstva laganih betona da bi znali kada ga je efikasno primijeniti.

Neke od primjena laganog betona su [7]:

- U konstruktivne svrhe
- U izolacijske svrhe
- U konstruktivno – izolacijske svrhe

Prema tehnologiji izrade lakog betona dijelimo ih na [7]:

- Lakoagregatne betone
- Čelijaste betone
- Lake betone od jednakozrnatog agregata

Općenito, lagani beton je svestran materijal koji nudi mnoge prednosti i postaje sve popularniji u građevinskoj industriji u posljednjih nekoliko godina.

2.1. Svojstva laganih betona

Posebnost laganih betona je naravno njihova gustoća, koja se kreće u granica od 300 kg/m^3 do 2000 kg/m^3 . Takva gustoća nam je bitna jer smanjuje vlastitu težinu betona i nudi nam više mogućnosti kod projektiranja. Osim gustoće ostala svojstva koja ćemo gledati su čvrstoća, modul elastičnosti, koeficijent toplinske provodljivosti itd.

Čvrstoća laganog betona se kreće u granicama od 1 do 60 MPa. Ovako veliki raspon čvrstoće posljedica je velikoga izbora raznolikih vrsta agregata. Najmanju čvrstoću davati će agregati poput perlita ili vermikulita, te će se takvi betoni najčešće koristiti u izolacijske svrhe. Najveće čvrstoće će davati agregati poput ekspaniranog škriljca ili ekspanirane gline, te takvi će se betoni koristiti u konstruktivne svrhe. Osim o agregatu čvrstoća ovisi i o gustoći, količini i vrsti veziva te o vodocementnom faktoru. [8]

Ovisno o željenoj čvrstoći potrebna količina cementa biti će u granicama od $150 - 550 \text{ kg/m}^3$. To je do 70 % više cementa za lagane betone u odnosu na obične. Time se povećava cijena betona jer je cement ujedno i najskuplji dio betona. [9]

Modul elastičnosti laganih betona manji od modula elastičnosti običnih betona. Kreće se u vrijednosti oko 20 GPa, dok su obični oko 35 GPa. Osim sniženog modula elastičnosti, lagani betoni su krtiji, te imaju elastično ponašanje do samoga sloma. [9]

Toplinska izolacija je još jedna prednost laganih betona. Generalno smanjivanjem gustoće poboljšavati će se izolacija laganih betona. Time ćemo razlikovati izolacijske lagane betone čija će se toplinska provodljivost kretati od $0,08 \text{ W/mK}$ i konstruktivno – izolacijske lagane betone čija će toplinska provodljivost biti od $0,2 - 1 \text{ W/mK}$. [8]

Zvučna izolacija je također prednost laganih betona i ona će isto ovisiti o njegovoj gustoći. [8]

Otpornost na požar je isto prednost laganog betona, zbog svojih izolacijskih svojstava. Najbolje rezultate dobiti ćemo koristeći agregate od vulkanskog podrijetla. Za usporedbu otpornost na požar ploče od laganog betona debljine 11,5 cm je 4 sata, dok je otpornost na požar ploče od običnog betona debljine 15,3 cm 3 sata. [9]

Skupljanje i bubrenje lakih betona je veliko. Skupljanjem laganog betona nastaju mrežaste pukotine koje utječu na osnovna svojstva betona. Iznosi skupljanja laganog betona sa agregatom od perlita je 0.1 to 0.2 %, vermikulit 0,1 %, škriljevca i gline 0,02

do 0,08%, a skupljanje agregata običnog betona je od 0.04 to 0.08 %. Osim agregata na skupljanje utječe još i količina vode, cementa i dodataka. [9]

Puzanje laganog betona je znatno veće od puzanja običnoga betona, a ovisiti će o vrsti agregata te o uvjetima u kojima se beton nalazi. [8]

Vodopropusnost laganih betona je veća od običnih betona. To je iz razloga što imaju više pora koje mogu upiti vodu. Zbog velike vodopropusnosti dolazi do mogućnosti prodora vlage i ostalih štetnih primjesa u betona. Time se povećava šansa za korozijom armature. Da bi to spriječili biti će nam potreban otprilike duplo veći sloj laganog betona u odnosu na običan beton. Osim toga možemo koristiti dodatne premaze da bit povećali otpornost i bolje zaštitili beton. [8] [9]

2.2. Podjela laganih betona

Prema tehnologiji izrade postoji više različitih vrsta laganih betona. Svaka od njih ima svoje jedinstvene specifičnosti, te prednosti i nedostatke. [7]

- ❖ Lakoagregatni betoni
- ❖ Čelijasti betoni
- ❖ Lagani betoni od jednakozrnatog agregata

2.2.1. Lakoagregatni betoni

Kao što i sam naziv govori lakoagregatni betoni su (uglavnom) betoni kojima je krupni agregat zamijenjen laganim agregatom, a sitna frakcija je prirodni materijal.

Lagani agregati imaju strukturu koju čini skelet s velikim brojem šupljina, te ih većina ima gustu vanjsku ljusku i porozniju unutrašnjost. Iz tog razloga ovakvi agregati će upijati (ili ispuštati) velike količine vode, što će pristavljati problem pri doziranju vode kod miješanja cementa. Prema vrstama lagane agregate dijelimo na: [7]

- Prirodne
- Ekspandirane i pečene (umjetne)
- Sekundarne sirovine

Prirodni lagani agregati

Prirodni lagani agregati su agregati uglavnom vulkanskog porijekla, te ih zbog toga pronalazimo samo u određenim dijelovima svijeta. Najpoznatiji su *plavac* i *scoria*. [10]

Plavac (plovućac) je svijetla i izuzetno porozna magmatska stijena nastala tijekom naglih erupcija vulkana. Nastaje iz magme koja ima veliku količinu plina u sebi, te ima riolitni sastav. Pore su nastale jer su mjehurići plina koji su ostali zarobljeni tijekom brzog hlađenja magme bogate plinom, te atomi iz taline nisu imali dovoljno vremena da se poslože u kristalnu strukturu. Daljnjom obradom pečenjem možemo mu smanjiti poroznost. Nasipna gustoća mu je između 500 i 800 kg/m³. [6] [10]



Slika 2 plavac [11]

Scoria je materijal sličan plovućcu ali tamnije boje. Sadrži veće i pravilnije oblikovane ljuske koje nisu povezane. [10]

Ekspandirani i pečeni agregati

Ove agregate dobivamo umjetnim putem, preradom već gotovih proizvoda. Za dobivanje ovakvih agregata postoje razni tehnološki procesi koji nam to omogućuju. Poput ekspandiranja, te sintetiziranja materijala.

Ekspandiranje je proces zagrijavanja materijala iznad 1000°C, što izaziva ekspanzije plinova da bi postigli stvaranje ćelijaste strukture materijala nakon čega se postepeno hladi.

Sinteriranje je toplinska obrada sitnozrnatih materijala na temperaturu površinskog taljenja, gdje se zrna spajaju u čvrste i porozne nakupine.

Agregat od ekspanirane gline ili škrljevca (glinopor, keramzit)– Proizvodi se zagrijavanjem gline ili škrljevca u rotacijskoj peći pri čemu dolazi do ekspanzije plinova u smjesi. Zatim se nastavlja peći na temperaturi do 1200°C. Ekspanirane kuglice su četiri do pet puta veće od izvorne veličine (od 0 do 30 mm). Izvana se stvara tvrda kora, dok je materijal iznutra porozan. Iz tog razloga materijal ima malu nasipnu gustoću (između 240 – 880 kg/m³), te visoku vodoupojnost od 18 do 23% svoje veličine. Koeficijent toplinske provodljivosti je oko 0,1 W/mK. Uglavnom se koristi za konstrukcijske, te konstrukcijsko - izolacijske svrhe. [12]



Slika 3 ekspanirana glina [12]

Perlit (ekspanirano staklo) – je oblik amornog vulkanskog stakla. Nastaje zagrijavanjem do točke tališta temperature 900 do 1100°C, nakon čega zbog nastanka pare ekspanira. Ekspaniranjem se formira ćelijasta struktura koja ima vrlo malu gustoću (od 30 do 250 kg/m³). Osim toga koeficijent provodljivosti topline je otprilike 0,05 W/mK, ima vrlo malu čvrstoće, te ima veliku sposobnost apsorpcije vlage (400% vlastite težine). Iz tih razloga se koristi uglavnom za izolacijske svrhe. [13]



Slika 4 Perlit [13]

Vermikulit je prirodni mineral. Zagrijavanjem na temperaturu od 650 do 950°C dolazi do ekspanzije gdje će narasti 8 do 30 puta svoje originalne veličine. Nakon

ekspanzije nasipna gustoća je od 60 do 130 kg/m³. Mehanička svojstva vermikulit betona su slična kao perlit betona. [7] [8]



Slika 5 Vermikulit [13]

Sekundarne sirovine

Građevinska industrija je jedan od najvećih potrošača prirodnih resursa, te stvara znatne količine otpadnog materijala. Iz tog razloga u novije vrijeme sve više istražujemo i nastojimo pronaći sve bolje načine za uporabom sekundarnih sirovina. Time bismo pridonijeli zaštiti prirodnih resursa ali i pomogli sa problemom zagađenja okoliša sa otpadnim materijalom. Osim prednosti za okoliš, primjena takvih agregata je i ekonomična jer ti proizvodi obično nastaju kao otpaci neke industrije koje onda možemo jeftino kupiti. Za agregate u proizvodnji lakog betona primjenjujemo zgure, leteći pepeo, te drobljenu opeku.

Zgura je otpadni proizvod nastao taljenjem raznih ruda i rabljenih metala.



Slika 6 Zgura visoke peći [14]

Ložišna zgura je nastala kao ostatak prilikom izgaranja ugljena ili koksa. Njihove karakteristike će ovisiti o vrsti goriva koji se koristio za izgaranje. Volumna masa je od 600 do 1500 kg/m³.

Zgure visoke peći su u trenutku izlaska iz visoke peći u tekućem obliku te imaju velik broj zarobljenih plinova u sebi. Primijenjena tehnologija hlađenja će uvjetovati rast

kristala minerala te količinu zarobljenog zraka. Razlikujemo kristalnu zguru visokih peći, granuliranu zguru i pjenušavu zguru.

Kristalna zgura visokih peći dobije se sporim hlađenjem zgure iz visokih peći. Njezine karakteristike su da je porozna ali i čvrsta. Volumna masa je od 500 do 1700 kg/m³. [8]

Granulirana zgura nastaje naglim hlađenjem zgure na način da je potopimo u vodi. Njezine karakteristike su da je krta i trošna. Volumna masa je oko 800 kg/m³. [8]

Pjenušava (ekspandirana) zgura je nastala hlađenjem zgure pomoću mlazova vode. Iz razloga što će pri tome dolaziti do velikog stvaranja pare, zgura će povećati svoj volumen. Volumna masa je od 300 do 750 kg/m³. [8]

Leteći pepeo nastaje kao sporedni materijal pri izgaranju ugljena u termoelektranama. To je fini praškasti materijal koji se odnosi ispušnim plinovima elektrane te skuplja kroz izlazne filtere. Sastoji se od malih sferičnih čestica alumosilikatnog stakla. Promjeri čestica su od 0,005 do 0,1 mm. Od letećeg pepela možemo proizvesti lagani agregat tako da ga peletiziramo, te ga sinteriramo na način da ga pečemo u rotacijskoj peći na temperaturi od 1000 do 1200°C. Volumna masa mu je od 500 do 800 kg/m³. [8]



Slika 7 leteći pepeo [15]

2.2.2. Lagani betoni od jednakozrnatog agregata

Izrađuju se izostavljanjem sitne frakcije agregata i uporabom praktički jedne frakcije agregata iste veličine zrna. Najveće zrno agregata je obično 10 – 20 mm. Posljedica odabira ovakvog granulacijskog sastava je da ostaju velike šupljine među zrnima jer su zrna obavijena tankim slojem cementne paste (1,3 mm). Gustoća ovih betona ovisi prvenstveno o granulometrijskom sastavu, ali i o vrsti agregata koji koristimo jer možemo koristiti i lagane agregate (poput glinopora). Otporni su na cikluse smrzavanja i odmrzavanja jer gotovo nemaju kapilarnih pora (vc omjer im je od 0,35 do 0,45). Još jedna bitna karakteristika je da vrlo dobro apsorbiraju zvuk. Iz tog razloga se koriste izolacijske svrhe. [7]



Slika 8 Lagani betoni od jednakozrnatog agregata [8]

2.2.3. Čelijasti betoni

Čelijasti betoni su vrsta laganog betona koja ima jednoličnu strukturu od malih mjehurića koji međusobno nisu povezani. Ovi mjehurići su promjera od 0,1 do 1 mm te gotovo sfernog oblika. Količina mjehurića i njihova veličina će određivati fizikalna svojstva materijala. Čelijasti betoni su lagani, imaju nisku toplinsku provodljivost, visoku vatrootpornost, nisku tlačnu čvrstoću i nisku otpornost na smrzavanje zbog veličine i rasporeda pora. Postoje različiti načini kreiranja ćelija poput korištenja kemijskih sredstava koji uključuju zrak u mort, sredstava za pjenjenje koji se dodaju mješavini, te vakuumsko stvrdnjavanje koje stvara pore zbog unutarnjih naprezanja nastalih u pasti. Najbolje rezultate daju sredstva za pjenjenje jer su dobivene tlačne čvrstoće veće. Prilikom proizvodnje potrebno je paziti da je zarobljeni zrak jednoliko raspodijeljen u smjesi. Stvrdnjavanje ćelijskog betona može se postići pod normalnim uvjetima, sa parom, te korištenjem autoklava. Prema već spomenutim načinima kreiranja ćelija razlikujemo plinobetone i pjenobetone. [16]

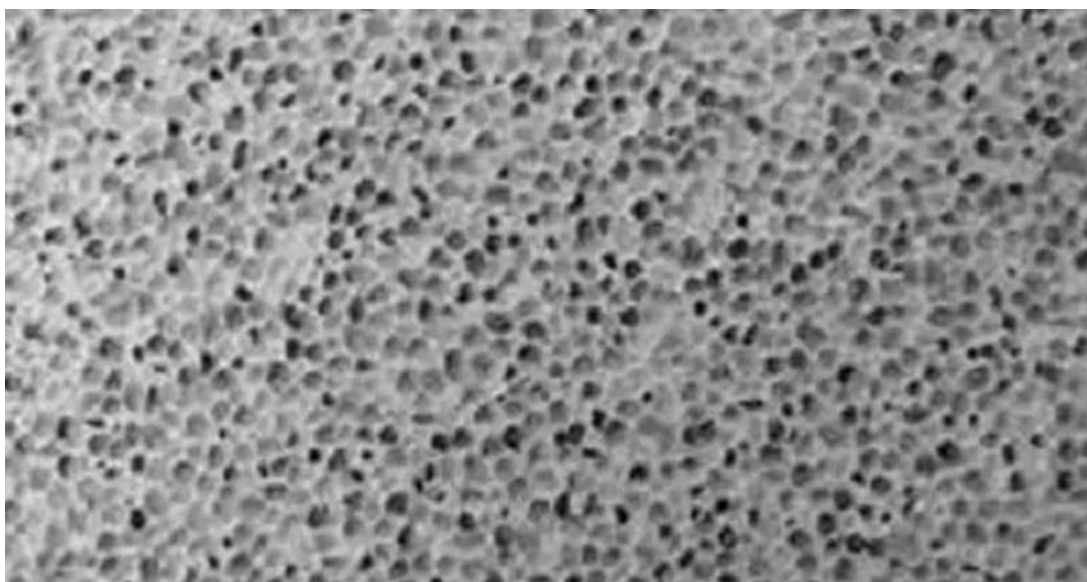
Plinobeton su vrsta laganog betona kod kojeg su zračne šupljine uhvaćene u matricu morta pomoću odgovarajućeg kemijskog sredstva za uključivanje zraka. To se radi tijekom tekuće ili plastične faze što će uzrokovati povećanje volumena, te kada plin isticuri ostaviti proznu strukturu. Kemijska sredstva koja se koriste su: aluminijev prah (proizvodi vodik, koristio ga je proizvođač Siporex), vodikov peroksid (proizvodi kisik) i kalcijev karbid (proizvodi acetilen, ytong). Plinobeton se prema metodi stvrdnjavanja dijele na stvrdnjavanje u normalnim uvjetima i stvrdnjavanje u autoklavama. Stvrdnjavanje u autoklavama se koristi zbog toga što se pri visokim temperaturama aktiviraju i znatno ubrzaju pucolanske reakcije letećeg pepela i sitnog kvarcnog pijeska, istovremeno se zbog dodataka izaziva ekspanzija plina. Gustoća plinobetona se kreće od 400 do 700 kg/m³, tlačna čvrstoća od 1 do 9 MPa, a koeficijent toplinske provodljivosti je od 0,07 do 0,2 W/mK. Primjena plinobetona je da se koristi za proizvodnju predgotovljenih elemenata poput elemenata za zidanje, zidne i stropne ploče te toplinsko izolacijske obložne ploče. [17]



Slika 9 plinobeton [18]

Pjenobeton nastaju dodavanjem sredstva za pjenjenje u mješavinu. Sastoje se od cementa, pijeska, vode, agregata, te dodatnih materijala poput letećeg pepela, plastifikatora i vlakna. Postoji više faktora koji utječu na svojstva pjenobetona poput korištenog pjenila, način proizvodnje pjene te korištene smjese. Najpopularnije pjenila su obično sintetička i na bazi proteina. Pjenila na bazi proteina daju bolje i zatvorenije strukture mjehurića što omogućava zarobljavanje većih količina zraka, dok sintetičke daju veću ekspanziju a time i manju gustoću. Za proizvodnju pjene postoje metode miješanja i metoda prethodno oblikovane pjene. Metoda miješanja dodavamo pjenilo u mikser koji stvara mjehuriće zbog velike brzine rotacije. Ovo je jednostavna, standardizirana i često korištena metoda, međutim može proizvesti veliki volumen oštećenih mjehurića. Metoda prethodno oblikovane pjene koristi opremu za komprimirani

zrak za stvaranje mjehurića koji se kasnije dodavaju mortu. Prethodno oblikovana pjena može biti suha ili mokra. Suha pjena je stabilnija i stvara mjehuriće ispod 1 mm što olakšava ravnomjerno miješanje i pumpanje. Mokra pjena proizvodi mjehuriće između 2 i 5 mm ali je nestabilnija. Metoda prethodno oblikovane pjene je skuplja za primijeniti od metode miješanja ali stvara učinkovitiju pjenu bolje kvalitete. Gustoća pjenobetona se kreće od 280 do 1800 kg/m³, tlačna čvrstoća od 0,6 do 43 MPa a koeficijent toplinske provodljivosti je od 0,1 do 0,7 W/mK. Pjenobetoni niže gustoće primjenjuju se za izolacijske svrhe, dok se pjenobetoni više gustoće koriste za konstrukcijske elemente. Ostala primjena pjenobetona je za proizvodnju laganih blokova i predgotovljenih ploča, protupožarna izolacija, toplinska i zvučna izolacija, temeljna podloga za cestu, stabilizaciju tla, barijere za apsorpciju udaraca od prometa... [19]



Slika 10 pjenobetoni [20]

Ekspandirani polistiren (EPS) još se naziva i stiroporom ili bijelim stiroporom. Proizvodi se postupkom polimerizacije od stirena. Nakon polimerizacije dodava se sredstvo za ekspanziju poput heksana. Zatim imamo tri faze proizvodnje EPS-sa. Prva faza je predekspanzija, gdje zagrijavamo sirovinu parom na temperaturi od 80 do 100°C. Tijekom zagrijavanja dolazi do ekspanzije gdje će doći do povećanja volumena na 30 do 50 puta početnog. Druga faza je sazrijevanja gdje se kuglice ostavlja u prozračene silose da bi sazrele, te time dolazi do poboljšanja njihovih elastičnih svojstava što im dozvoljava sposobnost daljnjeg širenja. Treća faza je ekspanzija gdje prethodno ekspandirane kuglice oblikujemo i opet izlažemo pari da bi se međusobno povezale. EPS ima gustoću od 12 – 46 kg/m³, koeficijent toplinske provodljivosti je od 0,034 do 0,038 W/mK i malu vodoupojnost. Iz tog razloga se prvenstveno koristi za izolacijske svrhe poput toplinske

izolacije zidova, podova i krovova, te za zvučnu izolaciju u konstrukcijama plivajućih podova. [21] [22]



Slika 11 pred-ekspandirane granule polistirena [21]

3. INTERNACIONALNI STANDARDI

3.1. Internacionalni standardi za lagane agregate

Iako smo u prijašnjim odjelcima rekli dosta toga o laganim agregatima u nastavku ćemo pogledati kako su lagani agregati („lightweight aggregates – LWA“) definirani u internacionalnim standardima.

ASTM („*American Society for Testing and Materials*“) definira standarde ASTM C330M, ASTM C331M, ASTM C332M. Ti standardi razlikuju tri različita načina primjene laganih agregata: za primjenu u konstrukcijskom laganom agregatu, za primjenu kod zidanja laganim agregatom i za izolacijske svrhe. [23] [24] [25]

ASTM standardi također imaju izričit popis pokrivenih LWA:

1. Agregati pripremljeni ekspanzijom, peletiranjem ili sinteriranjem proizvoda kao što su zgora visokih peći, glina, leteći pepeo i škriljevac.
2. Agregati pripremljeni obradom prirodnih materijala, poput plovuća, scoria, tuf.
3. Agregati nastali od krajnjih proizvoda izgaranja ugljena ili koksa.

ASTM C330M i ASTM C331M definiraju i svojstva agregata da bi mogli razlikovati normalni i lagani agregat. Prvenstveno je definirana gornja granica nasipne gustoće:

- ❖ Za sitni LWA to je 1120 kg/m^3 .
- ❖ Za krupni LWA to je 880 kg/m^3 .
- ❖ Za kombinaciju oba to je 1040 kg/m^3 .

Osim toga, moguće je proizvesti lagani beton sa LWA sukladno tablici gdje je tlačna čvrstoća testirana na cilindričnim uzorcima. [23] [24] [25] [26]

Tablica 1 tražena tlačna i vlačna čvrstoća LWA [24]

Calculated Equilibrium Density max, kg/m^3	Average 28-day Splitting Tensile Strength, min, MPa	Average 28-day Compressive Strength, min, MPa
All Lightweight Aggregate		
1760	2.2	28
1680	2.1	21
1600	2.0	17
Combination of Normal Weight and Lightweight Aggregate		
1840	2.3	28
1760	3.1	21
1680	2.1	17

Europski norma EN 13055 vrijedi za lagane agregate koji se koriste za sve vrste laganog betona. Oni uzimaju u obzir samo lagane agregate mineralnog porijekla, te ih navodi samo njihove izvore: [27]

- ❖ Prirodni izvori
- ❖ Umjetni
- ❖ Sekundarne sirovine

Mogući raspon primjena, te njihova ograničenja dodatno su definirana u normi. Ograničenja se odnose na: [27]

- ❖ nasipnu gustoću koja mora biti manja od 1200 kg/m^3 .
- ❖ gustoću čestica koja mora biti manja od 2000 kg/m^3 .

Otpor gnječenju je standardni test za uspoređivanje krupnih LWA, ali treba imati na umu da je taj test bio namijenjen za kontrolu proizvodnje i sukladnosti. EN 13055 ističe da nema jednostavnog odnosa između otpora na drobljenje i njihovih svojstava za krajnje korištenje. [27]

3.2. Internacionalni standardi za lagane betone

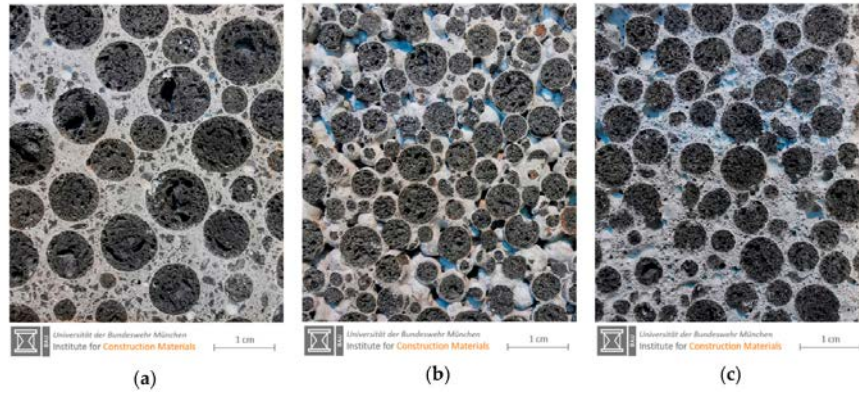
ACI („*The American Concrete Institute*“) u vodiču za lagani beton ACI 213R-14 („*Guide for Structural lightweight-aggregate concrete*“) definira: [28]

- ❖ konstrukcijski lagani beton („*SLC – structural lightweight concrete*“) koji ima minimalnu tlačnu čvrstoću od 17 MPa, i gustoću između 1120 i 1920 kg/m^3 .
- ❖ Beton specifične gustoće („*SDC – specified density concrete*“) koji ima gustoću između 800 i 2240 kg/m^3 .

U Europi, konstrukcijski lagani beton („*LC - light concrete*“) je pokriven kao materijal u EN 206, a njegova primjena regulirana u normi EN 1992. Minimalna tlačna čvrstoća je L8/9 i govori nam o karakterističnoj tlačnoj čvrstoći cilindra od 8 MPa i karakterističnoj tlačnoj čvrstoći kocke od 9 MPa. EN 1992 zahtjeva minimalnu čvrstoću od LC12/13, čvrstoće idu do LC80/88. Suha gustoća bi se kreće od 800 do 2000 kg/m^3 . Gustoće su podijeljene u razrede po 200 kg/m^3 , međutim čvrstoća betona ovisi o njegovoj gustoći. [29] [30]

Osim laganog betona postoji i lagano agregatni beton sa otvorenom strukturom („*LAC – lightweight aggregate concrete with open structure*“). Njegova svojstva se bitno razlikuju od LC i definirana su u EN 1520. Suha gustoća se kreće od 400 do 2000 kg/m^3 , a čvrstoća se kreće LAC 2 do LAC 25, koje se definiraju sa karakterističnom čvrstoćom od 100 mm jezgri koje su izbušene iz LAC elemenata. Lagano agregatni beton je definiran

sa šupljinama između agregata koje ostaju u strukturi nakon zbijanja. Te šupljine nastaju ograničavanjem količine cementne paste na količinu potrebnu za vezivanje agregata. Svojstva LAC se mogu dalje poboljšati koristeći poroznu matricu (koristeći aerante u cementnoj pasti). [31]



Slika 12 a) Strukturalni lagani beton sa gustom strukturom matrice b) lagano agregatni beton sa otvorenom strukturom c) LAC sa poroznom matricom i otvorenom strukturom [32]

4. PROIZVODNJA BETONA OD LAGANOG AGREGATA

Proizvodnja laganog betona se razlikuje od normalnog betona. Ta razlika nastaje zbog korištenja laganih agregata. [33]

Prije pravljenja moramo uzeti u obzir željenu čvrstoću, gustoću, trajnost... Kada želimo postići željenu čvrstoću moramo odabrati lagani agregat koji će moći ostvariti tu čvrstoću. To je iz razloga što čvrstoća laganog agregata postavlja maksimalnu čvrstoću koju lagani beton može ostvariti. Prag iznad kojeg je čvrstoća laganog agregata odlučujuća, a snaga matrice sekundarna zove se granica čvrstoće. [34]

Lagani agregati upijaju velike količine vode, iz tog razloga dizajn smjese laganog betona mora uvijek uzeti u obzir količinu vode koju će lagani agregati upiti. w_{60} govori vrijednost vode koju će lagani agregati upiti u 60 minuta i tipičan je parametar laganih agregata. [35]

Zamjena sitne frakcije pijeska sa laganim pijeskom smanjuje gustoću laganog betona za otprilike 200 kg/m^3 i poboljšava izolacijska svojstva, ali ujedno i smanjuje čvrstoću betona. Upijanje vode je posebno veliko kod sitnog laganog agregata (od 25 do 40% težine) i mora se uzeti u obzir. [34]

Vrlo je bitno uzeti u obzir upijanje vode laganog agregata jer će nekontrolirano upijanje imati posljedicu stvaranja mikropukotina u betonu. To se događa iz razloga što lagani agregati uzimaju vodu iz veziva tijekom plastične faze betona koja se kasnije ne može nadomjestiti. [36]

Doziranje sastojaka LC bi uvijek trebalo biti volumetrijsko (dm^3/m^3), jer je težinsko doziranje daje neprecizne mjere za LC. [34]

4.1. Ostali sastojci (materijali) za proizvodnju laganog betona

Normalni agregat

LC većinom koriste kombinaciju grubog laganih agregata sa normalnim pijeskom. To je iz razloga jer se sitni lagani agregati često mogu kupiti samo kao drobljeni materijal, što uzrokuje veće potrebe za vodom i utječe na obradivost betona. Odluka o vrsti pijeska koji se koristi ovisi o željenoj čvrstoći, gustoći i toplinskoj provodljivosti.

Vezivo

LC se mogu napraviti sa bilo kojim cementom, iako se preporuča korištenje cementa sa umjerenim specifičnim oslobađanjem topline poput cementa sa zgurom visoke peći.

Voda

Bilo kakva voda koja se koristi za proizvodnju običnog betona se može koristiti i za lagane betone. [37]

Dodaci

Bilo kakvi dodaci koji se koriste za proizvodnju običnog betona mogu se koristiti i za lagane betone, međutim potrebno je provjeriti kompatibilnost između veziva i laganog agregata prvo.

4.2. Spravljanje LC

Doziranje laganog agregata bi uvijek trebalo biti volumetrijsko, međutim često u betonarama takav način doziranja nije moguć. Zbog toga bi trebali provjeravati sadržaj vlage, apsorpciju te nasipnu gustoću laganog agregata da bi mogli pravilno prilagoditi doziranje. Ostale komponente se mjere kao i obično. [34]

Spravljanje laganog betona se radi na način da prilikom miješanja prvo dodajemo lagane agregate i dvije trećine potrebne vode. To uključuje vodu koju smo dodali da bi uzeli u obzir upijanje vode od laganog agregata i pogotovo sitnog laganog agregata ako smo se odlučili za takvu smjesu. Nakon toga miješamo 30 sekundi. Potom dodajemo cement sa ostatkom vode i željene aditive. Aditive se dodaju na samom kraju da bi izbjegli njihovo upijanje u lagane agregate. Zatim nastavljamo miješati 90 sekundi za razliku od normalnog betona kod kojeg miješanje traje 30 – 60 sekundi. [32]

Prisilne miješalice su poželjne kod proizvodnje konstrukcijskog laganog betona i ako je moguće da su im lopatice obložene sa plastičnom oblogom. To se radi iz razloga što lopatice mogu zdrobiti lagani agregat i obično se zdrobi od 5 do 10% laganog agregata u betonarama. Drobljenje laganog betona uzrokuje apsorpciju veće količine vode od strane laganog agregata te smanjuje obradivost betona. [32]

Kako bi se osigurala tražena kvaliteta svježeg laganog betona, važno je provjeriti njegovu jediničnu težinu i ukupni prinos. Postoje dvije metoda za to. Prva metoda je usporediti svježu gustoću sa gustoćom iz dizajna mješavine. Drugi način uključuje laboratorijska ispitivanja efektivnog volumena od probne serije, da bi provjerili odgovarali li postignuti volumen planiranom. [32]

Važno je ispraviti početni dizajn mješavine sa faktorom prinosa. Zbog raznih nesigurnosti prinos LC može varirati 5 do 10% u smislu volumena. [32]

Posljedica velikog upijanja laganog agregata jest da udaljenosti i trajanje do ugradnje imaju velik utjecaj na obradivost laganog betona u usporedbi sa normalnim betonom. Stupanj zbijenosti bi se trebao koristiti za procjenu obradivosti laganog betona, jer test rasprostiranja („flow test“) može dovesti do pogrešnih zaključaka iz razloga što težina agregata djeluje kao glavna pokretačka sila tog testa. Kod LC različite vrijednosti testa rasprostiranja mogu pokazivati istu vrijednost obradivosti ovisno o vrsti korištenog laganog agregata. [32]

4.3. Postavljanje i rukovanje LC

Konstruktivski lagani betoni zahtijevaju jednaku tehniku postavljanja kao i normalni betoni. Za postavljanje laganog betona većinom se koriste kible što je jedan od razloga rjeđeg korištenja laganog betona. U SAD-u se koriste pumpe za ugrađivanje laganog betona, ali samo ako koriste vlažne agregate. Tehnologija u Europi je u zadnjih par godina napredovala do toga da se čak i lagani betoni koji sadrže zasićene površinski suhe agregate mogu pumpati. [28]

Prilikom pumpanje LC betona čiji agregati nisu zasićeni vodom, tlak od pumpe uzrokuje da se voda iz cementne paste skupa sa sitnim česticama ulazi u pore laganog agregata koje su već bile ispunjene zrakom. Ovo smanjuje volumen i konzistenciju laganog betona. Čim pritisak pumpe popusti zrak zarobljen u porama „gura“ cementnu pastu van pora. To može dovesti do segregacije betona i time do neuspjeha pumpanja. To se može dogoditi čak i ako koristimo vlažan agregat. Jedan od načina izbjegavanja toga je korištenje posebnog samozbijajućeg dizajna laganog betona. Preporuča se uvijek napraviti probno testiranje prije pumpanja na gradilištu. [32]

Čak i ako je pumpanje laganog betona bilo uspješno, može doći do negativnog efekta na kvalitetu stvrdnutog betona. Uzrok je opet voda koja je ušla u pore laganog agregata. Nakon prestanka djelovanja tlaka od pumpe, zrak iz pora će „izgurati“ vodu van i time može doći do stvaranja vodenog sloja oko agregata. [38]

4.4. Doziranje sastojaka laganog betona

U prijašnjem odjeljku smo već spomenuli nešto o doziranju laganog betona, međutim sada ćemo napraviti dublji pogled u tu temu. Pogledati ćemo studiju koju su proveli Keun-Hyeok, Gwang-Hee Kim i Yong-Hwa Choi sa ciljem da odrede postupak određivanja smjese laganih agregata za lagani beton [39]. Potrebno je odrediti jedinične vrijednosti sadržaja svakog sastojka da bi postigli specifične vrijednosti betona poput slijeganja, tlačne čvrstoće, suhe gustoće i sadržaja zraka u betonu. Istraživači su koristili podatke o 347 uzoraka laganog betona da bi stvorili empirijske jednadžbe za određivanje omjera cementa i vode, te potrebne količine vode. Također su uspostavili matematičko rješenje za određivanje omjera grubog agregata po jedinici težine na temelju volumena i suhe gustoće betona.

Prije uvoda potrebno je napomenuti izrazi poput lakoagregatni beton („LWAC – lightweight aggregate concrete“), potpuno lakoagregatni beton („ALWAC–all lightweight aggregate concrete,“) i pijesak lakoagregatni beton („SLAWC–sand lightweight aggregate concrete“) se ne spominju u standardima i često su subjekti individualnih definicija [32]. Unatoč tome ti izrazi se koriste u ovoj studiji, pa da ne bi bilo zabune u nastavku mi ćemo smatrati:

- lagani LC – lagani beton koji je napravljen od laganog sitnog pijeska i laganog krupnog agregata.
- Pijesak LC – lagani beton koji je napravljen od običnog pijeska (normalne težine) i laganog krupnog agregata.

4.4.1. Uvod u studiju

Studija je koristila agregate i beton koji su u skladu sa standardima ASTM C330 i ACI 213R-14 o kojima smo već govorili [23].

Kao bazu podataka za napraviti ovu studiju koristili su podatke iz dostupnih literatura. Treba napomenuti da u nekim literaturama nisu svi podatci bili dostupni [40].

Baza podataka se sastojala od 39 mješavina lagani LC i 308 mješavina pijesak LC. Korišteni agregati su većinom bili ekspanzirani leteći pepeo i glina, upijanje vode je bilo između 5 i 28% [40].

Svojstva betona iz baze podataka:

Lagani LC	Pijesak LC
Tlačna čvrstoća 11 – 40 MPa	Tlačna čvrstoća 15 – 57 MPa
Suha gustoća 1236 – 1735 kg/m ³	Suha gustoća 1320 – 2024 kg/m ³
Vodocementi omjer 0,28 – 0,65	Vodocementi omjer 0,28 – 0,65
Jedinična količina vode 139 – 242 kg/m ³	Jedinična količina vode 145 – 260 kg/m ³
Volumetrijski omjer krupnih agregata po težini 0,45 – 0,82	Volumetrijski omjer krupnih agregata po težini 0,33 – 0,82

4.4.2. Formuliranje jednadžbi za dizajn betona

Danas se dizajn laganog betona uglavnom radi izrađivanja probnih mješavina na temelju željene obradivosti i tlačne čvrstoće [41]. Međutim koriste se informacije iz prethodno napravljenih sličnih mješavina koje koriste agregate iz istog izvora. Kako bi se taj problem riješio ova studija je predložila korištenje racionalnih jednadžbi koje su formulirane kroz nelinearnu multi regresijsku analizu koristeći SPSS softver.

Ciljana svojstva su bila:

- S_i – početno slijeganje betona
- v_A - količina uvučenog zraka u beton po jedinici volumena svježeg betona
- f_c' - tlačna čvrstoća (28 dana) MPa
- γ_{con} - suha gustoća betona kg/m^3 .

Formulirani su parametri za:

- ❖ omjer W/C
- ❖ W – jedinični sadržaj vode kg/m^3
- ❖ V_G – Volumetrijski omjer krupnih agregata po jedinici težine agregata.

4.4.3. Srednja tlačna čvrstoća

Promjene u svojstvima, omjerima sastojaka i načinu miješanja i postavljana laganog betona uzrokuje promjenu u čvrstoći stvrdnutog betona. Zbog toga se srednja tlačna čvrstoća f_{cr}' betona koristi kao osnova za odabir omjera sastojaka betona koristeći standardnu devijaciju uzoraka λ_s .

ACI 214 je definirao vrijednost λ_v od 15 % [42], međutim Nowak i Szerszen su pokazali da bi ta prosječna vrijednost trebala biti manja [43]. Odabrana vrijednost u ovom radu je zbog toga bila λ_v jednaka 12,5%. Prema tome jednadžba koja se nalazi u ACI 318 – 11 [44] i prikazuje odnos između f_{cr}' i f_c' je:

$$f_{CR}' = f_c' + 1,34\lambda_v \approx 1,167f_c' \quad (1)$$

f_c' – tlačna čvrstoća (28 dana) MPa

f_{cr}' – srednja tlačna čvrstoća MPa

4.4.4. W/C omjer

Generalno čvrstoća betona je inverzno proporcionalna W/C omjeru i količini uvučenog zraka [45]. Isto tako znamo da tlačna čvrstoća raste sa gustoćom. Rezultat toga je da nam je potreban manji omjer W/C za beton sa nižom gustoćom da bi ostvarili jednaku tlačnu čvrstoću.

Gustoća ovisi o količini zamijenjenog lakog agregata sa običnim pijeskom:

$$R_{LFA} = \frac{v_{FL}}{v_{FL} + v_{FS}} \quad (2)$$

v_{FL} – volumen lakog sitnog agregata po jedinici volumena betona m^3/m^3

v_{FS} – volumen pijeska po jedinici volumena betona m^3/m^3

Iz ovoga možemo zaključiti da niža vrijednosti W/C se može očekivati za veće vrijednosti R_{LFA} za željenu čvrstoću betona.

NLMR analizom dolazimo do sljedećeg izraza za W/C omjer [39]:

$$\frac{W}{C} = 0,72 \left(\frac{1}{v_A} \right)^2 \cdot \left(\frac{\gamma_{con}}{\gamma_0} \right) \cdot \left(\frac{f_0}{f_c} \right) \quad (3)$$

f_0 – referentna tlačna čvrstoća betona 10 MPa

f_c' – tlačna čvrstoća (28 dana) MPa

v_A – količina uvučenog zraka u beton po jedinici volumena svježeg betona

γ_0 – referentna gustoća betona (2300 kg/m^3)

γ_{con} – suha gustoća betona kg/m^3

4.4.5. Potrebna količina vode

Potrebna količina vode (W) po jedinici volumena za postizanje željeno slijeganje betona ovisi o: omjeru sitnih i krupnih agregata, količini uvučenog zraka i vrsti kemijskog sredstva za redukciju vode [39].

Ova studija je provela NLMR analizu bez sredstva za smanjivanje vode, te su dobili jednadžbu za predviđanje početnog slijeganja.

Rezultati te jednadžbe (4) su davali vrijednosti koje su više bile u skladu sa eksperimentima nego u preporukama napisanim u ACI 211.2-98 [41] jer su tamo razmatrali samo ovisnost količine vode i slijeganja obzirom na maksimalnu veličinu agregata.

$$W = \left(\frac{W_0}{V_g}\right) \cdot \left(\frac{1}{R_{LFA} + 1}\right)^{0,067} \cdot \left(\frac{1}{v_A}\right)^{0,133} \cdot \left(\frac{S_i}{S_0}\right)^{0,333} \quad (kg/m^3) \quad (4)$$

R_{LFA} – Volumetrijski iznos zamjene laganog sitnog agregata za pijesak

S_0 – referentno slijeganje betona (300 mm)

S_i – početno slijeganje betona (mm)

V_G – Volumetrijski omjer krupnih agregata po jedinici težine agregata

v_A – količina uvučenog zraka u beton po jedinici volumena svježeg betona

W_0 – referentna jedinica sadržaja vode 100 kg/m³

4.4.6. Određivanje volumetrijskog odnosa (V_G) od krupnih agregata

Određivanje prikladnog volumena agregata po jedinici betona je neophodna da bi dobili beton sa željenom obradivosti. ACI 211.2-98 [41] predlaže empirijske vrijednosti za vrijednost V_G koristeći nominalnu maksimalnu veličinu agregata i modul finoće sitnog agregata normalne težine koji je u suhom stanju. Međutim na obradivost LC utječu i W/C omjer, W – jedinični sadržaj vode, prividna gustoća i jedinična težina agregata.

Nadalje postupak za određivanje V_G treba razmotriti dali je ciljana vrijednost gustoće γ_{con} dostižna za zadana fizikalna svojstva agregata i željenu tlačnu čvrstoću betona. Ovo nisu uzeli u obzir kod ACI.

Ova studija je napravila matematičko rješenje koje uključuje sve te parametre koji utječu na obradivost betona da bi odredili V_G [39].

Željena gustoća je određena kao rubni uvjet. Obično je 20 do 25 % vode od sadržaja cementa potrebno za hidrataciju i to je uračunato u NMLR analizi da bi dobili formulu za γ_{con} [39].

$$\gamma_{con} = 1,25C + G_L + F_S + F_L + 120 \quad (kg/m^2) \quad (5)$$

C – količina cementa kg/m³

F_L – količina laganog agregata kg/m³

F_S – količina običnog agregata kg/m³

G_L – količina krupnog agregata kg/m³

Kao drugi rubni uvjet primijenjena je apsolutna veličina svježeg betona za određivanje volumetrijskog omjera krupnih agregata po jedinici težine agregata V_G .

$$1 = v_c + v_w + v_{GL} + v_{FS} + v_{FL} + v_A \quad (6)$$

v_A – količina uvučenog zraka u beton po jedinici volumena svježeg betona

v_c – volumen cementa po jedinici volumena betona m^3/m^3

v_{FL} – volumen lakog sitnog agregata po jedinici volumena betona m^3/m^3

v_{FS} – volumen pijeska po jedinici volumena betona m^3/m^3

v_{GL} – volumen grubog agregata po jedinici volumena betona m^3/m^3

v_w – volumen vode po jedinici volumena betona m^3/m^3

Te kada sve te jednadžbe iskoristimo dobijemo:

$$p_1 V_G^2 + p_2 V_G + p_3 = 0 \quad (7)$$

Gdje su

$$p_1 = \frac{-\rho_{GL} + \frac{\gamma_{FL} \cdot R_{LFA} \cdot \rho_{GL}}{\gamma_{GL}}}{(1 - R_{LFA}) \cdot \gamma_{FS}} + \frac{\rho_{GL}}{\gamma_{GL}} \quad (8)$$

$$p_2 = \frac{\gamma_{con} - \gamma_{FL} \cdot R_{LFA} \cdot (1 - v_A) - 120}{(1 - R_{LFA}) \cdot \gamma_{FS}} + v_A - 1 \quad (9)$$

$$p_3 = \frac{A_1}{\gamma_w} + \frac{A_1}{\gamma_c \cdot X_1} \cdot \left[\gamma_{FL} \cdot R_{LFA} \cdot A_1 \cdot \left(\frac{1}{\gamma_w} + \frac{1}{\gamma_c \cdot X_1} \right) - \frac{1,25 \cdot A_1}{X_1} \right] \frac{1}{(1 - R_{LFA}) \cdot \gamma_{FS}} \quad (10)$$

4.4.7. Zaključak o studiji i nedostaci

Zbog ograničenja ulaznih podataka, ova studija je optimizirana za sljedeće uvjete [39]:

- Tlačna čvrstoća između 18 i 50 MPa
- Suha gustoća između 1200 i 2000 kg/m³
- Maksimalna veličina agregatnog zrna 19 ili 25 mm.

Kako bi se provjerila pouzdanost predloženog postupka doziranja, napravljeno je pet mješavina konstrukcijskog laganog betona. Rezultati su bili da se ciljani zahtjevi dobro slažu sa izmjerenim rezultatima [39].

Eksperimentalni program za validaciju rezultata je proveden u uskim rasponima svojstava betona; unatoč tome može biti zaključeno da predloženi postupak daje razuman vodič za dobivanje prve probne mješavine. Najbolje rezultate će ipak davati korištenje omjera iz prethodno utvrđene proporcije za slične vrste betona koji koriste agregate sličnih svojstava [39].

5. MIKROSTRUKTURA LAGANOG BETONA

5.1. Međudjelovanje između matrice i laganog agregata

Normalni beton ima mikrostrukturu koja se sastoji od agregata, matrice i kontaktne zone („ITZ – interfacial transition zone“) [46], dok lagani beton neće imati ITZ kada je pravilno napravljen. Za to postoji više razloga:

1. Lagani agregata upijaju vodu skupa sa česticama cementa tijekom miješanja. Kao rezultat toga, produkti hidratacije ne samo da se stvaraju na vanjskoj površini, već do neke mjere unutar laganog agregata. [47]
2. Određene ekspanzirane gline imaju reaktivne faze klinkera (poput C_2AS), na vanjskoj površini grubog agregata. Kao rezultat toga, ovi lagani agregati mogu do neke mjere reagirati s komponentama veziva. [48]
3. Lagani agregati imaju hrapavu i poroznu površinu koja dopušta dobro mehaničko povezivanje. [49]
4. Voda apsorbirana u lagane agregate je dostupna za naknadnu obradu tijekom hidratacije. [50]

Kod normalnih betona visoke čvrstoće da bi poboljšali svojstva kontaktne zone dodajemo mikrosiliku u mješavinu čim dodamo agregate u mikser [51]. Lagani betoni nemaju naglašenu kontaktnu zonu, što utječe na način prenošenja opterećenja i na trajnost. U slučaju da želimo poboljšati svojstva kontaktne zone možemo i u lagani beton dodati mikrosiliku, samo moramo paziti da je dodamo na kraju miješanja jer će je inače lagani agregati upiti.

5.2. Nosivost laganog betona

Čvrstoća morta matrice uvjetuje čvrstoću normalnog betona. Prema tome možemo odrediti odnos tlačne čvrstoće između betona i matrice. Čvrstoća matrice ovisi o W/C omjeru i čvrstoći cementa. Čvrstoća agregata kod običnog betona je 1,5 do 2 puta veća od samog betona.

Kod laganog betona, čvrstoća laganog agregata je često manja od čvrstoće matrice. Iz tog razloga čvrstoća laganog agregata je presudna za određivanje čvrstoće betona, koja može biti manja nego čvrstoća same matrice. [49]

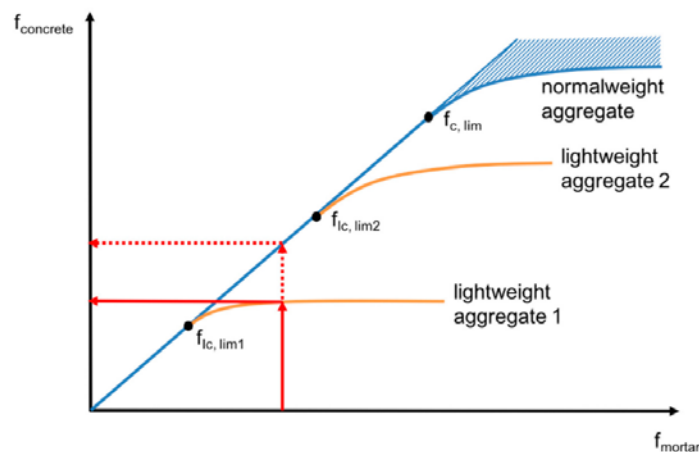
U početku pod djelovanjem tlačnog opterećenja, smjerovi trajektorija prenose se na koncentriran način od čestice do čestice krupnog agregata. Slojevi morta prenose ta tlačna

naprezanja i uglavnom su tlačno opterećena. Okomito na smjer naprezanja, nastaju vlačna naprezanja zbog otklona tlačnih naprezanja. Posljedica ovoga je da dolazi do pojave vlačnih naprezanja u mortu, a s time i povećanja pukotina i na kraju loma ispod granice čvrstoće.

Kako hidratacija nastavi, krutost i čvrstoća matrice može nadmašiti čvrstoću laganog agregata. U tom slučaju smjer unutrašnjih naprezanja se promjeni [49]. Glavna tlačna naprezanja sada prolaze oko čestica laganog agregata. Slojevi morta su tlačno opterećeni. Vlačna naprezanja nastaju ispod i poviše čestica laganog agregata okomito na smjer trajektorija opterećenja, (tj. okomito na smjer opterećenja). Ako vlačna naprezanja pređu granicu vlačnu čvrstoću matrice dolazi do nastajanja pukotina, čime se vlačna naprezanja postepeno prenose na čestice laganog agregata sve dok se i njihova vlačna čvrstoća ne pređe. Time dolazi do loma laganog agregata (i laganog betona). Granica poviše koje čvrstoća laganog agregata postaje odlučujući faktor za lagani beton se naziva granica čvrstoće $f_{lc, lim}$ [49].

Do neke mjere, ovisno o čvrstoći laganog agregata, čvrstoća laganog betona je više-manje jednaka čvrstoći matrice. Poslije ove granice, čvrstoća laganog betona se neproporcionalno povećava sa povećanjem čvrstoće matrice. [52]

Taj odnos možemo pogledati u dijagramu Slika 13 gdje agregat 1 ima manju gustoću od agregata 2. [53]



Slika 13 Prikaz $f_{lc, lim}$ kod različitih vrsta laganih i normalnih agregata [53]

Ovo se događa jer nakon granice čvrstoće, lagani agregati jako malo pridonose čvrstoći betona, te čvrstoća matrice se mora drastično povećati da bi povećali snagu betona.

Ovo nije isplativo raditi jer je cement najskuplji dio betona i bolje je izabrati agregat veće čvrstoće da bi dobili beton veće konačne čvrstoće. [32]

Ispod granice čvrstoće, čvrstoća matrice se samo malo razlikuje od čvrstoće betona. Ovo je važno za klase čvrstoće i faktore pretvorbe o čemu ćemo reći nešto više u nastavku.

6. FAKTOR KONVERZIJE

6.1. Faktor konverzije oblika za lagani beton

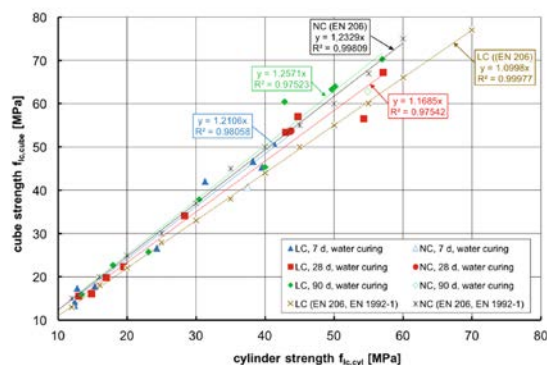
Tlačna čvrstoća je jedan od najvažnijih svojstva betona, i obično se ispituje pri starosti od 28 dana. U Europi ispitivanje se obično vrši na valjku jer ispitivanje s omjerom $h/d > 2$ daje prave vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće [30]. Međutim, zbog manje težine i lakše pripreme u nekim zemljama u Europi se idalje koriste kocke kao standard za ispitivanje.

Različiti oblici će davati različite čvrstoće, zbog toga koristimo faktore konverzije. Za normalne betone postoji više studija na tu temu [54], međutim za konstrukcijske lagane betone zbog svoje posebnosti i malog udjela na tržištu ne postoji puno informacija. Ono informacija što postoji je bazirano na laganim betonima niske čvrstoće.

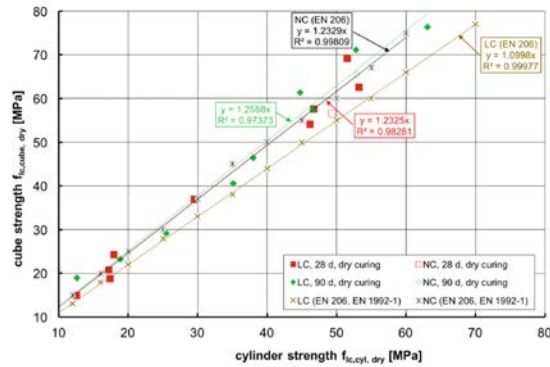
U EN 206 i EN 1992 faktori konverzije oblika za lagane i normalne betone se razlikuju. Faktor konverzije za lagane betone je 1,10, dok je za normalne betone 1,23.

Napravljena je studija za provjeriti vjerodostojnost faktora čvrstoće za lagane betone. Eksperimentalno je ispitivano devet različitih klasa čvrstoće laganog betona (od 15 do 70 MPa). Koristili su širok raspon laganih agregata, sa različitim čvrstoćama i gustoćama. Provjereni su faktori konverzije za dva seta uzoraka. Prvi set je stvrdnjavao u vodi i testiran pri 7, 28 i 90 danu. Drugi set je stvrdnjavao u vodi do 7 dana, a nakon toga na zraku i testirani su pri 28 i 90 danu [55].

Ovaj eksperiment je pokazao da faktori konverzije normalnog betona više odgovaraju za lagani beton zbog sličnog načina ponašanja laganog i normalnog betona *dok god čvrstoća laganog agregata nije limitirajući faktor* [55].



Slika 14 korelacija između valjaka i kocka čuvanih u vodi [55]



Slika 15 korelacija valjaka i kocaka čuvanih na zraku [55]

Rezultati ovog eksperimenta pokazali su:

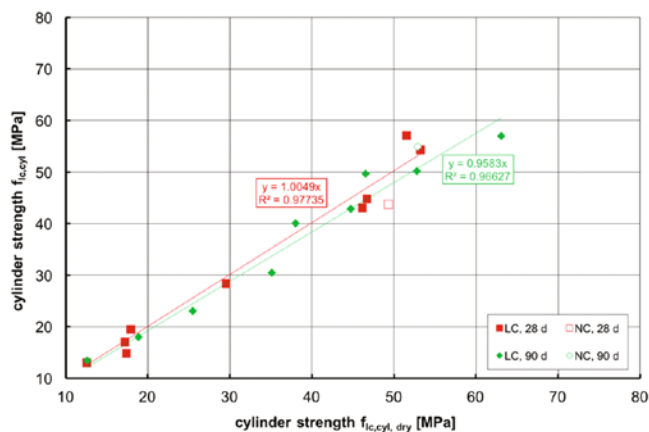
- ❖ Za lagane betone čuvane u vodi faktori konverzije su:
 - Pri 7 danu – 1,21
 - Pri 28 danu – 1,16
 - Pri 90 danu – 1,26
- ❖ Za lagane betone čuvane na zraku:
 - Pri 28 danu – 1,23
 - Pri 90 danu – 1,26

Zaključak je da korištenje faktora konverzije od 1,10 za lagani beton može dovesti do netočnog predviđanja tlačne čvrstoće cilindra, a u nekim slučajevima i do pogrešne klasifikacije čvrstoće ako se koriste samo kocke kao tipovi uzoraka [55].

6.2. Faktori konverzije za različite uvjete stvrdnjavanja

Testirani su i faktori konverzije na uvjete stvrdnjavanja.

Valjci od laganog betona ne pokazuju utjecaj zraka na stvrdnjavanje pri starosti od 28 dana, a valjci pri starosti od 90 dana pokazuju faktor konverzije od 0,96 [55].



Slika 16 korelacija između valjaka čuvanih u vodi i zraku pri različitim starostima [55]

Kocke pokazuju faktor konverzije od 0,96 i pri 28 i pri 90 danu. Treba napomenuti da veličina kocke će imati utjecaj na faktore konverzije, jer kod manjih kocaka će se kutovi brže sušiti [55].

7. PRIMJERI PRIMJENE LAGANOG BETONA

7.1. Stambeni blok u Berlinu

Napravljen je od laganog betona koji preuzima i nosivu i izolacijsku funkciju. Time su postigli dobivanje monolitne stambene strukture. [56]



Slika 17 Prikaz stambenog bloka [56]

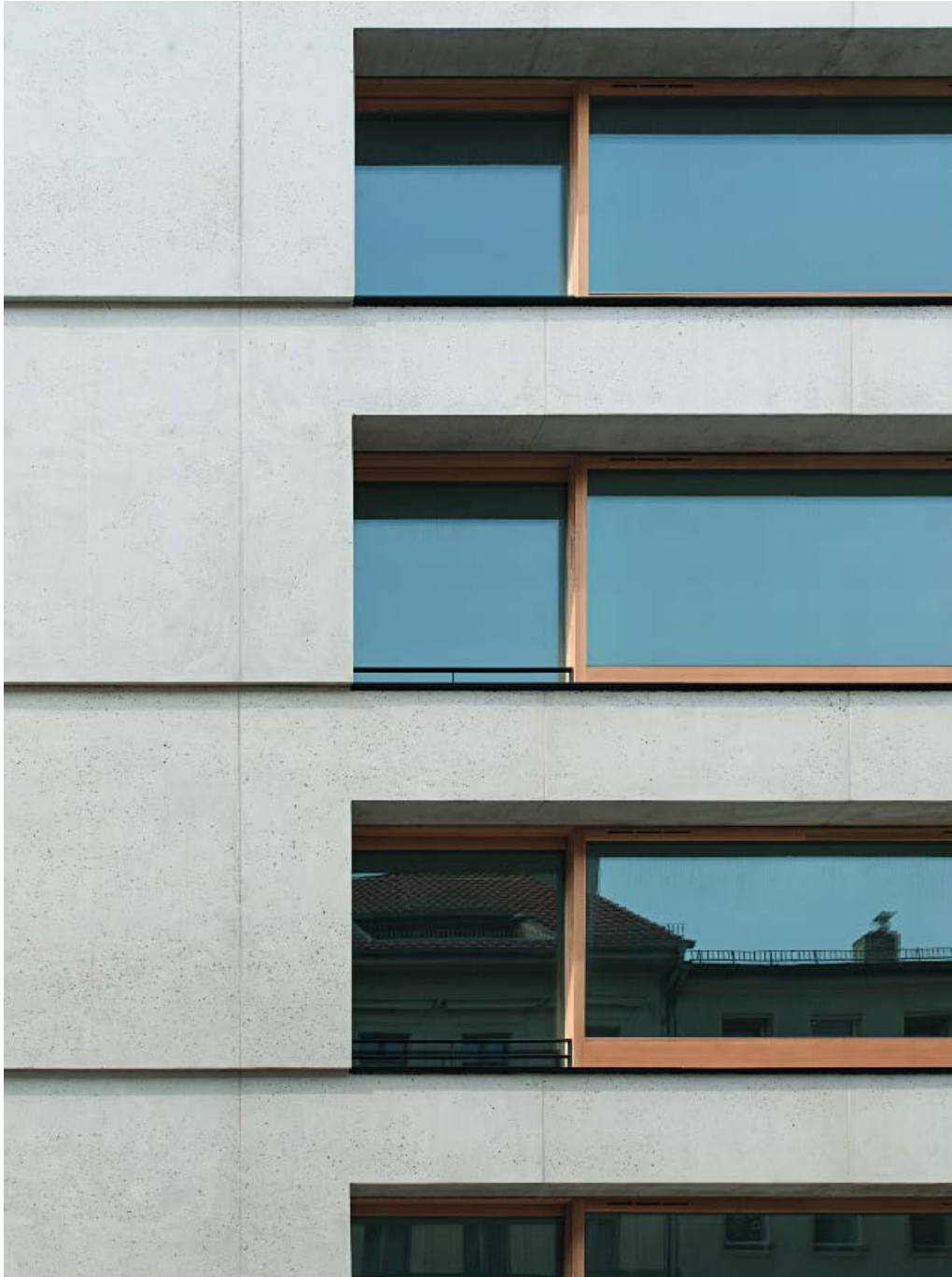
Vanjski zidovi su debljine 55 centimetara i time su postigli ostvarivanje minimalne razine toplinske izolacije. Energetske potrebe i gubitci energije ostaju unutar propisanih potreba zbog: [56]

1. Kompaktnog oblika gradnje
2. Korištenja troslojnog stakla
3. Kogeneracijskog postrojenja koje se nalazi u podrumu



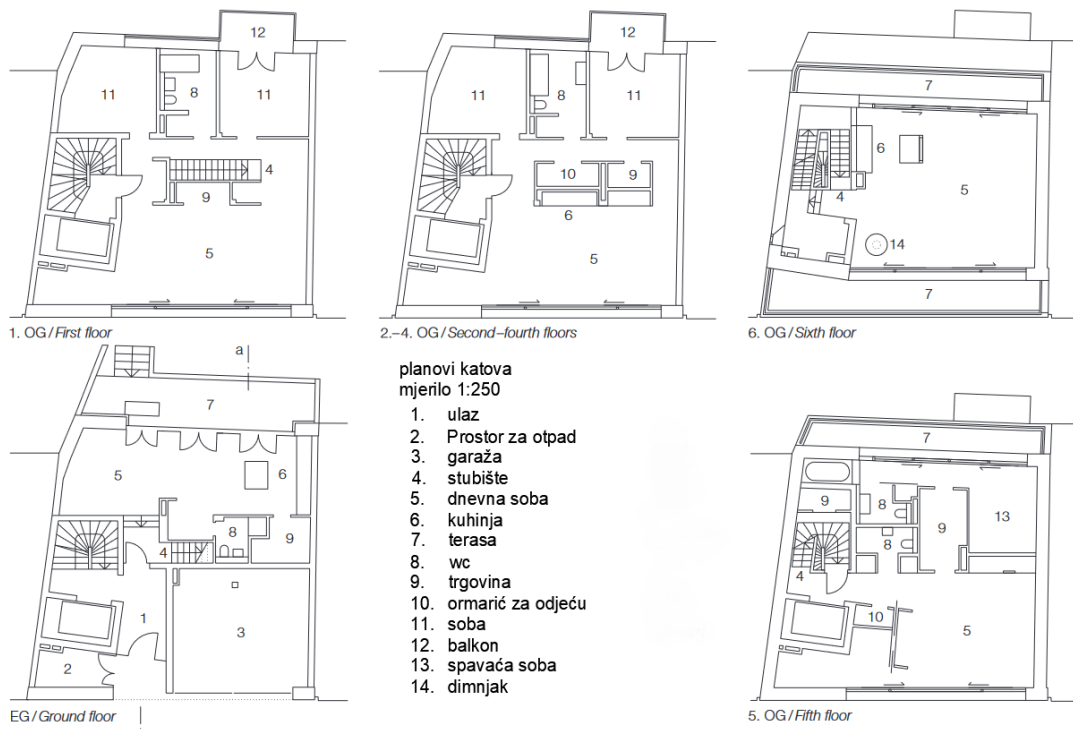
Slika 18 Unutrašnji prikaz prozora [56]

Korišteni raspored oplata je baziran na dimenzijama sistema „formwork“. Time su postigli pomaknuti raspored oplata na svakoj etaži koji je omogućio trodimenzionalno naglašavanje volumena zgrade i nenametljivu integraciju radnih spojeva između različitih faza betoniranja. [56]

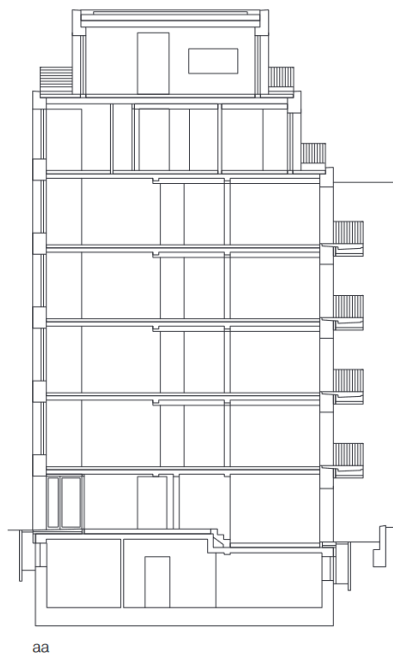


Slika 19 Trodimenzionalno naglašavanje volumena zgrade [56]

Tlocrtni i poprečni prikaz



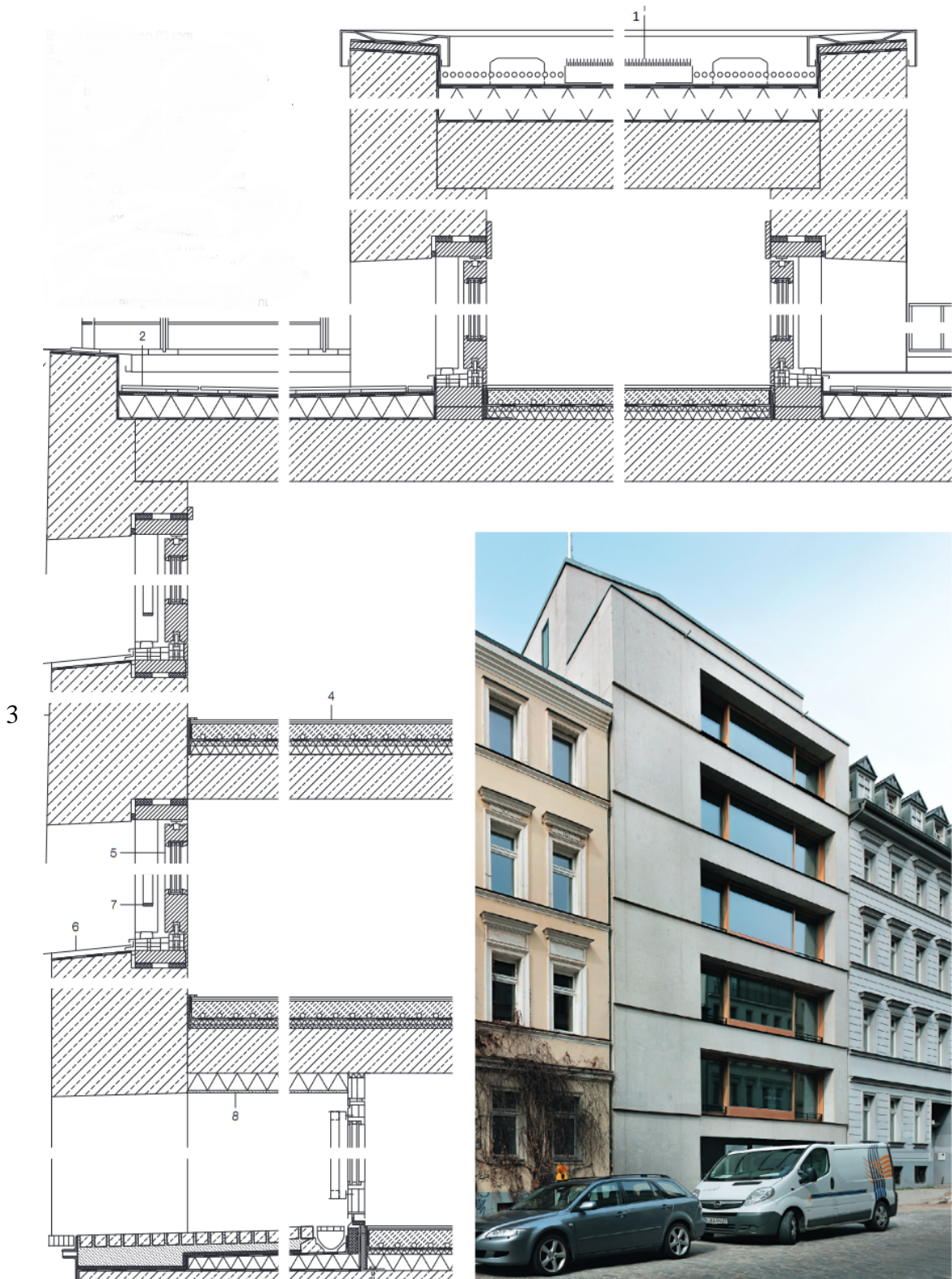
Slika 20 tlocrtni prikaz katova [56]



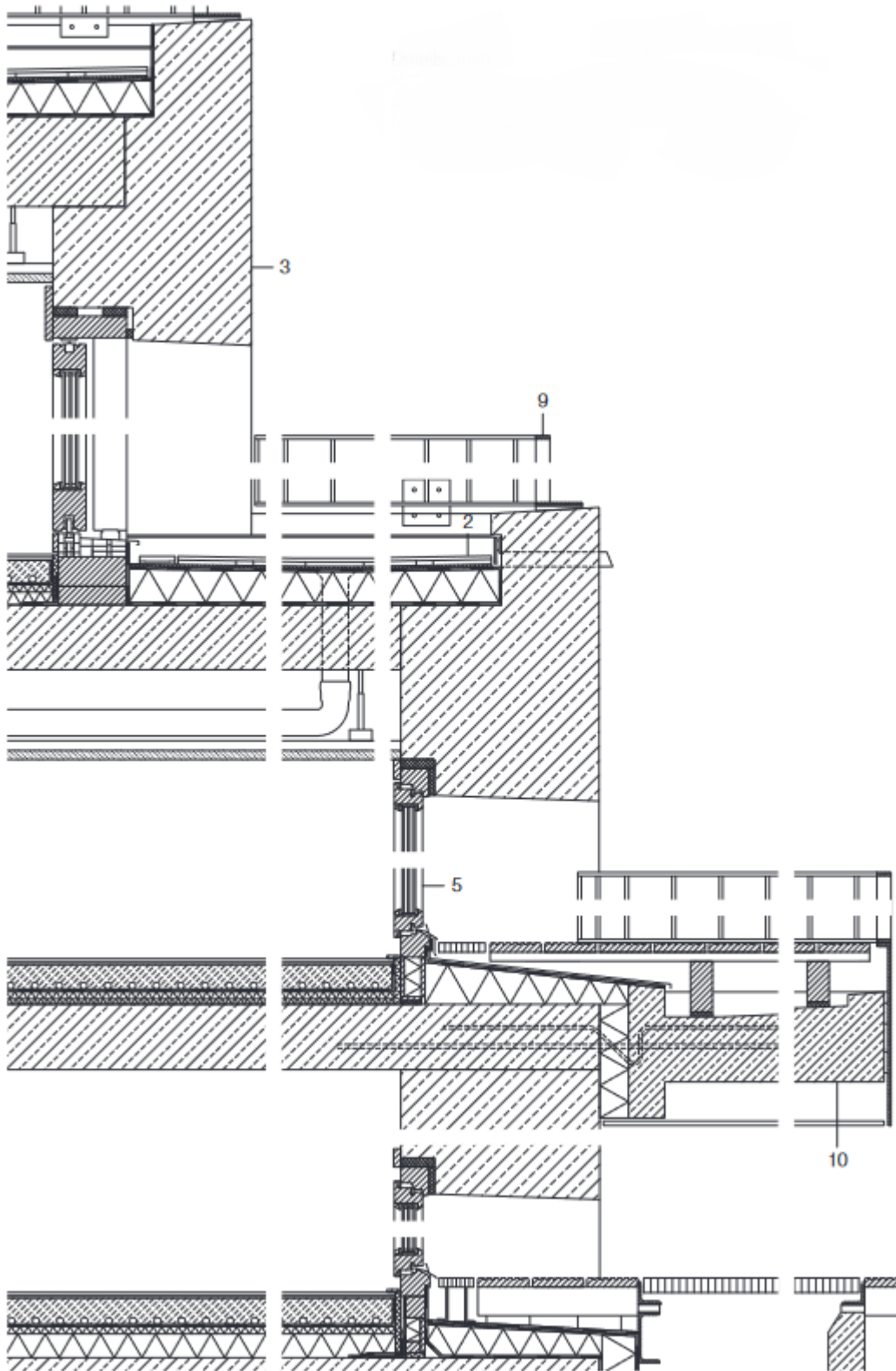
Slika 21 presjek aa [56]

Prikazi slojeva

1. 80 mm ekstenzivnog sadnog sloja
5 mm zaštitnog sloja ;5 mm brtvenog sloja
130 do 270 mm izolacije od ekspaniranog polistirena
parna barijera; 270 mm armiranobetonskog krova
2. 11 mm ploče za popločavanje
13 mm sloja za pričvršćenje; pasivna kapilarna drenaža
plastični brtveni sloj
80 – 100 mm izolacije; parna barijera
3. 550 mm vanjski izolacijski zid
4. 16 mm parket od hrasta
69 mm estrih s podnim grijanjem
polietilenski sloj; 20 mm izolacija od udarne buke
dodatna izolacija od 35 mm za medijske usluge
180 mm armiranobetonskog poda
5. Okviri od prozora od ariša sa trostrukim staklom
6. 3 mm presvučenog čeličnog lima
7. 40/10 mm pločasti pocinčani čelik s premazom u boji
8. Kompozitna toplinska izolacija
80 mm mineralne vune; žbuka
9. 50/10 mm pocinčanog čelika s premazom u boji
10. Prefabricirani betonski balkon, toplinski odvojen



Slika 22 slojevi 1 dio [56]



Slika 23 slojevi 2 dio [56]

7.2. Obiteljska kuća napravljena od plinobetona

Za izgradnju ove kuće koristili su predgotovljene elemente od plinobetona njegovanih u autoklavama. [57]



Slika 24 kuće od plinobetona [57]

Razlog korištenja plinobetona su: [57]

- Mala težina (80% volumena materijala je zrak)
- Možemo koristiti jedan materijal za izradu zidova, podova i krova
- Nisu potrebni dodatni slojevi izolacije
- Širok asortiman predgotovljenih elemenata je dostupan za kupnju
- Niži troškovi dostave, sastavljanja i održavanja

Plinobetoni imaju visoka nosiva svojstva za svoju gustoću što se može objasniti sa njihovom homogenom strukturom, dobrim načinom raspodjele opterećenja na cijelu površinu, te primjenom tankoslojnog morta (1-3 mm). [57]

Za toplinsku izolaciju vanjskih zidova koristili su samo jedan sloj plinobetona debljine 24 centimetra, što je davalo dobre energetske performanse.

Tablica 2 slojevi vanjskog zida [57]

vanjski zid $U = 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$		
	λ [W/mK]	d [cm]
žbuka	0,35	1
blokovi od plinobetona	0,09	30
vanjska žbuka	0,2	1

Za krovove i podove koristili su dodatne slojeve izolacije.

Tablica 3 slojevi krovišta [57]

krovište $U = 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$		
	λ [W/mK]	d [cm]
žbuka	0,35	1
krovne ploče	0,14	20
krovna greda	0,13	14
toplinska izolacija	0,04	14

Tablica 4 slojevi podruma [57]

podrumska etaža $U = 0,32 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$		
	λ [W/mK]	d [cm]
estrih	1,4	5
zvučna izolacija koraka	0,04	6
podne ploče	0,14	20

Osim dobre toplinske izolacije, plinobetoni imaju odličnu otpornost na požar, te odličnu zvučnu izolaciju.

Blokovi i ploče

Generalno se izvode na sljedeći način:

1. Nanese se vodoravna brtva protiv dizajuće vlage
2. Prvi blok se postavlja u sloj morta
3. Tankoslojni mort se nanese pomoću mistrije
4. Polaganje blokova. (veći blokovi se polažu pomoću mini – dizalice)



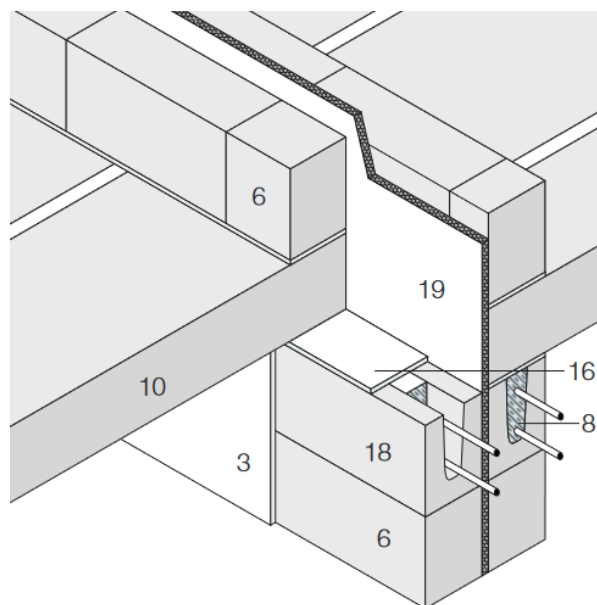
Slika 25 postavljanje blokova [57]



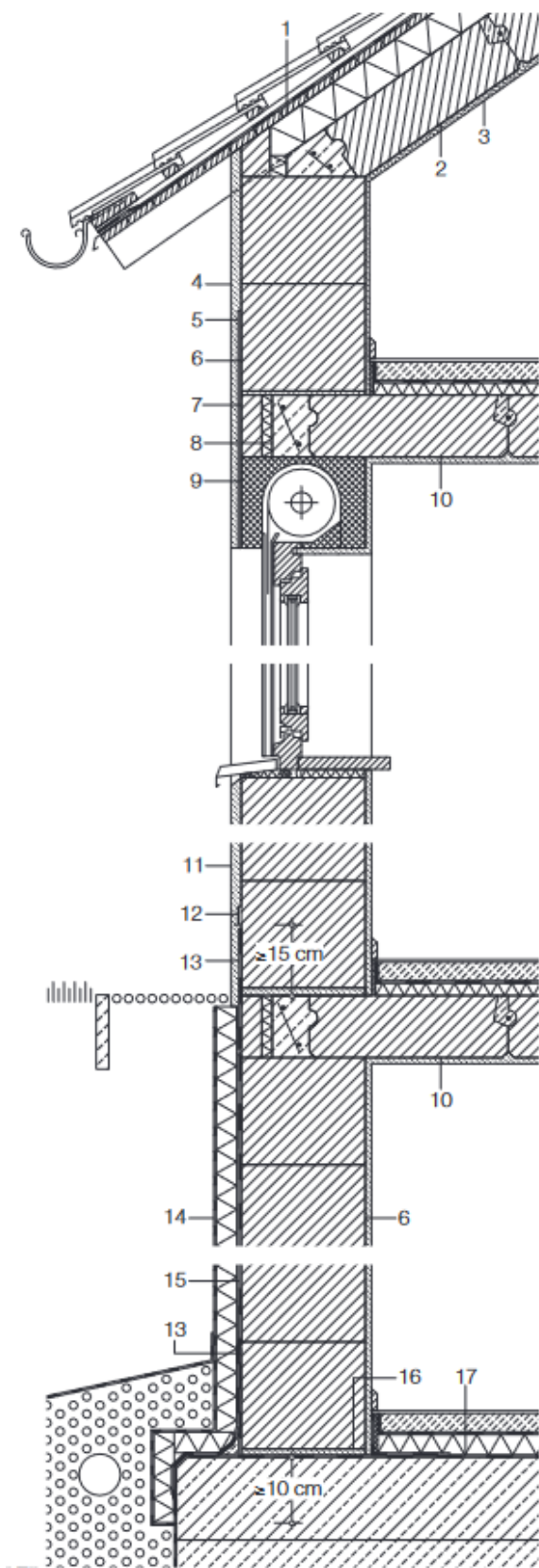
Slika 26 postavljanje visokih blokova [57]

Slojevi

1. Toplinska izolacija
2. Plinobetska krovna ploča
3. Žbuka
4. Vanjska žbuka
5. Platneni umetak
6. Plinobetonski blokovi
7. Plinobetonski rubni blok
8. Periferna vezna greda
9. Gipsana temeljna ploča na kutiji za rolete
10. Plinobetske podne ploče
11. Vanjska bazna žbuka za odbijanje vode
12. Prizemna spojnica za brtvljenje
13. Fleksibilna, ne skupljajuća pasta
14. filtarska podloga, drenažni sloj
15. zidna brtva, debeli bitumenski premaz
16. Sloj morta za izravnavanje
17. horizontalna brtva
18. U oblik plinobetona
19. materijal od mineralnih vlakana, tip t $d > 40$ mm



Slika 27 slojevi 1 dio [57]



Slika 28 slojevi 2 dio [57]

8. ZAKLJUČAK

Lagani betoni nude mnoge prednosti u raznim građevinskim projektima. Njihova niža gustoća smanjuje vlastitu težinu zgrade i nudi bolja izolacijska svojstva. Također možemo koristiti puno različitih materijala i procedura za napraviti ga što ga čini jako svestranim materijalom. Zbog korištenja laganih agregata, proizvodnja laganih betona se razlikuje od proizvodnje normalnih betona. Potrebno je unaprijed uzeti u obzir koju čvrstoću betona želimo jer će ona biti ograničena sa čvrstoćom korištenog agregata. Također zbog velike poroznosti laganih agregata potrebno je uzeti njihovu apsorpciju vode u obzir prilikom doziranja. Prikazane se jednadžbe koje se mogu koristiti za doziranje laganog betona, međutim najbolje rezultate idalje daje prethodno utvrđene proporcije za slične vrste betona koji koriste agregate sličnih svojstava. Standardi koji pokrivaju lagane betone imaju nedostatke poput faktora oblika koji mogu dovesti do pogrešne klasifikacije laganih betona u slučaju da se koriste kocke kao uzorak pri testiranju, te ne pokrivaju lagane betone suhe gustoće manje od 800 kg/m^3 . To predstavlja problem jer se u novije vrijeme sve više primjenjuje beton jako niske gustoće zbog svoje mogućnosti da naprave monolitni zid koji zadovoljava i uvjet nosivosti i izolacijskih svojstava.

9. LITERATURA

- [1] H. O. Lamprecht, *Opus Caementitium: Bautechnik der Römer* (5th edition), Düsseldorf, Germany: Beton-Verlag GmbH, 1996.
- [2] Expanded Clay and Slate Institute, "Lightweight Concrete History Applications Economics," Expanded Clay and Slate Institute (ESCSI), Salt Lake City, UT, USA, 1971.
- [3] T. A. Holm, "Performance of Structural Lightweight Concrete in a Marine Environment," in *Performance of Concrete in Marine Environments*, St. New Brunswick, NB, Canada, 1 August 1980.
- [4] K. D. Raithby and F. D. Lydon, "Lightweight concrete in highway bridges," *International Journal of Cement, Composites, and Lightweight Concrete*, vol. 3, pp. 133-146, 1981.
- [5] R. Bender, "The Concrete Ships of WWI and WWII: An Experiment In Maritime Construction," [Online]. Available: <https://www.concreteships.org/ships/ww1/atlantus/>. [Accessed 10 6 2023].
- [6] J. Newman, *Advanced Concrete Technology 3: Processes*, Elsevier, 2003.
- [7] V. Ukrainczyck, *BETON: struktura, svojstva, tehnologija*, Zagreb: Alcor, 1994.
- [8] D. Bjegović and N. Štirmer, *Teorija i tehnologija betona*, Zagreb: Zelina, 2015.
- [9] M. L. Deloney, "civiljungle," 12 1 2022. [Online]. Available: <https://civiljungle.com/lightweight-concrete/>. [Accessed 20 6 2023].
- [10] S. Chandra and L. Berntsson, *Lightweight aggregate concrete*, Norwich, NJ: Noyes Publications, 2003.
- [11] H. M. King, "geology," 2005. [Online]. Available: <https://geology.com/rocks/pumice.shtml>. [Accessed 13 6 2023].
- [12] R. E. D. Solutions, "Expanded clay aggregate | Clay Aggregate," [Online]. Available: <https://www.expandedclayaggregate.com/get-product-details/expanded-clay-aggregate-eca.html>. [Accessed 11 6 2023].

- [13] "ihome," techinfus, [Online]. Available: <https://ihome.techinfus.com/hr/otoplenie/xarakteristiki-i-osobennosti-teploizolyacii-perlit/>. [Accessed 29 5 2023].
- [14] "Wikipedia," 9 6 2023. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Slag>. [Accessed 21 6 2023].
- [15] T. Dale , "The Spruce," The Spruce, 4 4 2023. [Online]. Available: <https://www.thespruce.com/fly-ash-applications-844761>. [Accessed 21 6 2023].
- [16] L. Chica and A. Alzate, "Cellular concrete review: New trends for application in construction," *Construction and Building Materials*, vol. 200, pp. 637-647, 2019.
- [17] N. Narayanan and K. Ramamurthy, "Structure and properties of aerated concrete: a review," *Cement and Concrete Composites*, vol. 22, no. 5, pp. 321-329, 2000.
- [18] "The Constructor," 4 9 2013. [Online]. Available: <https://theconstructor.org/concrete/aerated-concrete-its-properties/6736/>. [Accessed 13 6 2023].
- [19] M. Y. Amran, N. Farzadnia and A. A. Ali, "Properties and applications of foamed concrete; a review," *Construction and Building Materials*, vol. 101, pp. 990-1005, 2015.
- [20] "The Constructor," 11 7 2021. [Online]. Available: <https://theconstructor.org/concrete/foam-concrete-materials-properties-advantages-production/15921/>. [Accessed 13 6 2023].
- [21] G. Cmrečki, "ARHITEKTURA+EKOLOGIJA," ARHITEKO d.o.o., 14 3 2005. [Online]. Available: http://www.arhiteko.hr/menu.html?http://www.arhiteko.hr/_polistiren.html. [Accessed 22 5 2023].
- [22] N. H. Ramli Sulong, S. A. Syaerah Mustapa and M. K. Abdul Rashid, "Application of expanded polystyrene (EPS) in buildings and constructions: A review," *Applied polymer science*, vol. 136, no. 20, 2019.

- [23] ASTM C330-17a, standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete, West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2017.
- [24] ASTM C331-17, Standard Specification for Lightweight aggregates for Concrete Masonry Units, West Conshohocken, PA, USA : ASTM International, 2017.
- [25] ASTM C332-17, Standard Specifiacation for Lightweight Aggregates for Insulating Concrete, West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2017.
- [26] ASTM C39M-16, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2016.
- [27] Deutsches Institut für Normung, Lightweight Aggregates - Lightweight Aggregates for Concrete, Mortar and Grout, Berlin, Germany: Beuth Verlag , 2016.
- [28] ACI Committee 213, ACI 213R-14 Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete, Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute, 2014.
- [29] DIN EN 206 , Concrete - Specification, Performance, Production, and Conformity, Berlin, Germany: Beuth Verlag, 2013.
- [30] DIN EN 1992-1-1, Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings, Berlin, Germany: Beuth Verlag, 2011.
- [31] DIN EN 1520, Prefabricated reinforced components of lightweight aggregate concrete with open structure with structural or non-structural reinforcement, Berlin, Germany: Beuth Verlag, 2011.
- [32] K.-C. Thienel, T. Haller and N. Beuntner, "Lightweight Concrete—From Basics to Innovations," *Materials* , vol. 13, no. 5, p. doi: 10.3390/ma13051120, 2020.
- [33] M. A. Elrahman, S.-Y. Chung and D. Stephan, "Effect of different expanded aggregates on the properties of lightweight concrete," *Magazine of Concrete Research*, vol. 71, no. 2, pp. 95-107, 2019.
- [34] K.-H. Yang, K. Gwang-Hee and C. Yong-Hwa, "An initial trial mixture proportioning procedure for structural lightweight aggregate concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 55, pp. 431-439, 2015.

- [35] DIN EN 1097-6, Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates - Part 6: Determination of Particle Density and Water Absorption, Berlin, Germany: Beuth Verlag, 2013.
- [36] L. Pietro, I. Shin-Ichi and M. O. Jensen, "Experimental observation of internal water curing of concrete," *Materials and Structures* , vol. 40, p. 211–220, 2007.
- [37] DIN EN 1008, Mixing Water for Concrete - Specification for Sampling, Testing and Assessing the Suitability of Water, Including Water Recovered from Processes in the Concrete Industry, as Mixing Water for Concrete, Berlin, Germany: Beuth Verlag, 2002.
- [38] S. Smeplass, "Moisture in Light Weight Aggregates-Practical Consequences for the Production Properties of Light Weight Aggregate Concrete," in *Proceedings of the Second International Conference on Structural Lightweight Aggregate Concrete*, Kristiansand, Norway, 2000.
- [39] K.-H. Yang, , G.-H. Kim and Y.-H. Choi, "An initial trial mixture proportioning procedure for structural lightweight aggregate concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 55, p. 431–439, 2014.
- [40] . K. H. Yang,, "Modeling of the mechanical properties of structural lightweight concrete based on size effects," Department of Plant Architectural Engineering, Kyonggi University, 2011.
- [41] ACI Committee 211, "Standard practice for selecting proportions for structural lightweight concrete," American Concrete Institute, 1998.
- [42] ACI Committee 214, "Recommended practice for evaluation of strength test results of concrete," American Concrete Institute, 1977.
- [43] A. S. Nowak and M. M. Szerszen, "Reliability-based calibration for structural concrete: phase 1," University of Michigan, 2001.
- [44] ACI Committee 318-11, "Building code requirements for structural concrete and commentary," American Concrete Institute, 2008.
- [45] A. M. Neville, "Properties of concrete," Addison Wesley Longman, 1995.

- [46] P. . K. Mehta and P. J. M. Monteiro, "Effect of Aggregate, Cement, and Mineral Admixtures on the Microstructure of the Transition Zone," *MRS Online Proceedings Library*, vol. 144, p. 65, 1987.
- [47] . M. H. Zhang, and O. Gjrv, "Penetration of cement paste into lightweight aggregate," *Cement and Concrete Research*, vol. 22, no. 1, pp. 47-55, 1992.
- [48] . C. Satish, B. Leif and S. L. Sarkar, "Interdependence of microstructure and strength of structural lightweight aggregate concrete," *Cement and Concrete Composites*, vol. 14, no. 4, pp. 239-248, 1992.
- [49] T. Faust, "Leichtbeton im Konstruktiven Ingenieurbau," Berlin, Germany, Ernst & Sohn, 2003, p. 307.
- [50] S. Weber and H. W. Reinhardt, "A Blend of Aggregates to Support Curing of Concrete," in *Proceedings of the International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete*, Sandefjord, Norway, 1995.
- [51] P. Monteiro, J. C. Maso and J. P. Olliver, "The aggregate-mortar interface," *Cement and Concrete Research*, vol. 15, no. 6, pp. 953-958, 1985.
- [52] J. A. Bogas, B. Ferrer, J. Pontes and S. Real, "Biphasic Compressive Behavior of Structural Lightweight Concrete," *ACI Materials Journal*, vol. 114, pp. 49-56, 2017.
- [53] K. C. Thienel and R. Sposito, "Effects of Specimen Shape, Size, Age and Curing on Compressive Strength Values Obtained for Structural Lightweight Concrete," *ALITinform: Cement. Concrete. Dry Mix.*, vol. 47, pp. 26-46, 2017.
- [54] A. M. Neville, "A General Relation for Strengths of Concrete Specimens of Different Shapes and Sizes," *American Concrete Institute*, vol. 63, no. 10, pp. 1095-1110, 1966.
- [55] C. Thienel, "Verification of Conversion Factors Used for Compressive Strength Values Obtained for Structural Lightweight Concrete," in *Proceedings of the fib Symposium 2017 High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet*, Maastricht, The Netherlands, 12-14 June 2017.

- [56] N. Schülke, A. Schmidt and J. Klingelhöffer, "Housing Block in Berlin," *DETAIL*, no. 6, pp. 595-599, 2014.
- [57] G. Flassenberg, "Autoclaved aerated concrete systems," *DETAIL*, no. 10, pp. 1134-1138, 2005.
- [58] S. Helland, R. Aarstein and M. Maage, "In-field performance of North Sea offshore platforms with regard to chloride resistance," *Structural Concrete*, vol. 11, pp. 15-24, 2010.
- [59] K. C. Thienel, "Application of Lightweight Concrete," in *Nordic Mini-Seminar: Structural Lightweight Aggregate Concrete*, Nordic Concrete Federation, 2019, pp. 6-9.