

# Proizvodnja i svojstva cementa

---

Štefok, Kristijan

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:564538>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-13**



image not found or type unknown

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)

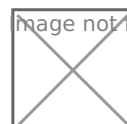


image not found or type unknown

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET

KRISTIJAN ŠTEFOK

PROIZVODNJA I SVOJSTVA CEMENTA

ZAVRŠNI RAD

RIJEKA, 2023.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**STRUČNI PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ**

**GRAĐEVINSKI MATERIJALI**

**Kristijan Štefok**

**JMBAG: 0112071377**

**PROIZVODNJA I SVOJSTVA CEMENTA**

**ZAVRŠNI RAD**

**Rijeka, rujan 2023.**

Izjava o samostalnoj izradi završnog rada:

## **I Z J A V A**

Ja, Kristijan Štefok, izjavljujem da sam samostalno izradio ovaj završni rad pod nazivom Proizvodnja i svojstva betona, u suradnji s mentoricom Izv. Prof. dr, sc, Neira Torić Malić. Svi izvori informacija korišteni u radu su navedeni i pravilno referencirani prema pravilima građevinske struke. Svi rezultati, analize i zaključci izneseni u radu su rezultati mojeg vlastitog istraživanja i interpretacije. Potvrđujem da nisam plagirao niti koristio tuđi rad ili ideje bez odgovarajuće citacije. Preuzimam potpunu odgovornost za autentičnost i originalnost ovog završnog rada. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

U Rijeci, 18.09.2023.

---

Kristijan Štefok

## S A D R Ź A J:

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2. POVIJEST NASTANKA CEMENTA</b> .....	<b>2</b>
<b>3. PROIZVODNJA CEMENTA</b> .....	<b>4</b>
3.1. Proizvodni proces cementa .....	4
3.1.1. Sirovine za proizvodnju cementa .....	5
3.1.2. Proizvodnja klinkera u rotacijskoj peći.....	6
3.1.3. Vertikalne peći .....	9
<b>4. SVOJSTVA I VRSTE CEMENTA</b> .....	<b>10</b>
4.1. Svojstva i vrste silikatnog cementa .....	11
4.2. Svojstva i vrste aluminatnog cementa.....	13
4.3. Održivi i ekološki cement.....	16
4.3.1. Značajke održivog i ekološkog cementa.....	17
4.3.2. Održivi i ekološki cement u Hrvatskoj.....	17
<b>5. PROIZVOĐAČI CEMENTA U HRVATSKOJ</b> .....	<b>18</b>
5.1. CEMEX Hrvatska d.d.....	19
5.2. Holcim (Hrvatska) d.o.o. ....	21
5.3. Nexe Group.....	21
<b>6. RAZVOJ PROIZVODNJE I PRIMJENA CEMENTA U GRAĐEVINARSTVU</b> .....	<b>21</b>
6.1. Proizvodi od cementa.....	24
<b>7. ODREĐIVANJE ČVRSTOĆE CEMENTNOG MORTA (HRN EN 196-1; 2005)</b> .....	<b>25</b>
7.1. Priprema svježeg cementnog morta.....	25
7.2. Priprema uzorka prizme za ispitivanje.....	27
7.3. Ispitivanje čvrstoće na vlak (savijanje).....	30
7.3.1. Rezultati ispitivanja čvrstoće na vlak 30.08.2023. HRN EN 196-1:.....	32
7.3.2. Analiza rezultata ispitivanja na vlak.....	36
7.4. Ispitivanje čvrstoće na tlak.....	36
7.4.1. Rezultati ispitivanja čvrstoće na tlak 30.08.2023. HRN EN 196-1:.....	38
7.4.2. Analiza rezultata ispitivanja na tlak.....	44

<b>8. ZAKLJUČAK</b> .....	<b>46</b>
<b>LITERATURA</b> .....	<b>48</b>

## POPIS TABLICA

<i>Tablica 1. Četiri osnovna minerala koji čine klinker.....</i>	<i>6</i>
<i>Tablica 2. Primjer kemijskog sastava sirovina za portlanski klinker.....</i>	<i>6</i>
<i>Tablica 3. Uzorci cementnih prizmi po oznakama.....</i>	<i>30</i>
<i>Tablica 4. Vlačna čvrstoća cementa savijanjem.....</i>	<i>35</i>
<i>Tablica 5. Tlačna čvrstoća cementa.....</i>	<i>43</i>

## POPIS SLIKA

<i>Slika 1. Engleski izumitelj V. Aspdin.....</i>	<i>3</i>
<i>Slika 2. Prve mašine za pakiranje cementa, Španjolska.....</i>	<i>3</i>
<i>Slika 3. Proces proizvodnje klinkera u rotacijskoj peći .....</i>	<i>7</i>
<i>Slika 4. Mljevenje klinkera, unutrašnjost mlina s kuglama.....</i>	<i>8</i>
<i>Slika 5. Potrošnja energije ovisno o postupku proizvodnje cementa.....</i>	<i>9</i>
<i>Slika 6. Moderni postupak pri proizvodnji cementa .....</i>	<i>9</i>
<i>Slika 7. Proces proizvodnje cementa u verikalnoj peći (lijevo), klinker dobiven taljenjem (desno).....</i>	<i>10</i>
<i>Slika 8. Oznaka vrste i klase cementa.....</i>	<i>10</i>
<i>Slika 9. Kristalizacija etringita.....</i>	<i>11</i>
<i>Slika 10. Sulfatna korozija cementnog kamena.....</i>	<i>11</i>
<i>Slika 11. Sastavi klinkera silikatnog cementa.....</i>	<i>12</i>
<i>Slika 12. Kemijski sastav silikatnog i aluminatnog klinkera.....</i>	<i>14</i>
<i>Slika 13. Klase aluminatnog cementa.....</i>	<i>14</i>
<i>Slika 14. Zahtjevi kvaliteta sirovina.....</i>	<i>15</i>
<i>Slika 15. Agregat Holcim.....</i>	<i>26</i>
<i>Slika 16. Reciklirani agregat.....</i>	<i>26</i>
<i>Slika 17. Agregat reciklirani asfalt.....</i>	<i>26</i>
<i>Slika 18. Laboratorijska miješalica.....</i>	<i>27</i>
<i>Slika 19. Cementni mort u kalupima.....</i>	<i>27</i>
<i>Slika 20. Odvajanje kalupa od cementnih prizmi.....</i>	<i>28</i>
<i>Slika 21. Prizme s Holcim agregatom.....</i>	<i>28</i>
<i>Slika 22. Prizme s recikliranim agregatom.....</i>	<i>28</i>
<i>Slika 23. Prizme s agregatom od recikliranog asfalta.....</i>	<i>28</i>

<i>Slika 24. Vodeni bazen za sazrijevanje cementnih prizmi.....</i>	<i>29</i>
<i>Slika 25. Ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem.....</i>	<i>31</i>
<i>Slika 26. Grafički prikaz nanošenja vlačog opterećenja na uzorak s klasičnim agregatom u vremenu, do sile sloma.....</i>	<i>32</i>
<i>Slika 27. Grafički prikaz nanošenja opterećenja vlačnog na uzorak s recikliranim asfaltom u vremenu, do sile sloma.....</i>	<i>33</i>
<i>Slika 28. Grafički prikaz nanošenja vlačnog opterećenja na uzorak s recikliranim agregatom u vremenu, do sile sloma.....</i>	<i>34</i>
<i>Slika 29. Grafički prikaz usporedbe uzoraka po prosječnoj čvrstoći, sili sloma i vremenu do trenutka sloma, ispitivanje na vlak.....</i>	<i>35</i>
<i>Slika 30. Ispitivanje tlačne čvrstoće.....</i>	<i>37</i>
<i>Slika 31. Oblik sloma uzorka, nakon spitivanja na tlak.....</i>	<i>37</i>
<i>Slika 32. Grafički prikaz nanošenja tlačnog opterećenja na uzorak s klasičnim agregatom u vremenu, do sile sloma.....</i>	<i>38,39</i>
<i>Slika 33. Grafički prikaz nanošenja tlačnog opterećenja na uzorak s agregatom reciklirani asfalt u vremenu, do sile sloma.....</i>	<i>40,41</i>
<i>Slika 34. Grafički prikaz nanošenja tlačnog opterećenja na uzorak s agregatom reciklirani asfalt u vremenu, do sile sloma.....</i>	<i>41,42</i>
<i>Slika 35. Grafički prikaz usporedbe uzoraka po prosječnoj čvrstoći, sili sloma i vremenu do trenutka sloma, ispitivanje na tlak.....</i>	<i>43</i>
<i>Slika 36. Uzorci cementnih prizmi nakon vlačnog i tlačnog ispitivanja.....</i>	<i>45</i>



## **SAŽETAK:**

Cement je vrsta veziva koja se koristi u građevinskoj industriji za povezivanje kompozitnih materijala kao što su pijesak, šljunak i voda u svrhu izrade materijala koji se koriste u građevinarstvu. Glavna funkcija cementa je stvaranje čvrstog spoja između komponenata kompozitnih materijala za izgradnju koji onda služe za oblikovanje elemenata konstrukcija kao što su temelji, stupovi i zidovi. Povijest cementa seže tisućama godina unatrag. U Hrvatskoj se proizvodnja cementa razvila tijekom 20. stoljeća. Tvornice cementa, poput tvornice u Rugvici blizu Zagreba, igrale su važnu ulogu u razvoju građevinske industrije i infrastrukture u zemlji. Najveće tvrtke za proizvodnju cementa u Hrvatskoj su CEMEX Hrvatska d.d., NEXE grupa i Holcim d.o.o.. Hrvatska cementna industrija danas proizvodi različite vrste cementa i specijalne vrste cementa s različitim svojstvima. Održiva proizvodnja cementa je koncept koji se sve više ističe u građevinskoj industriji. Proizvodnja tradicionalnog cementa obično generira značajne količine stakleničkih plinova kao što je ugljični dioksid (CO<sub>2</sub>) i drugi, pa se na ovaj način doprinosi smanjenju emisija, prerada otpadnog građevinskog materijala koja se ponovno koristi te u konačnici očuvanju okoliša. Iako cement ima svoju ulogu u izradi betona i cementnog morta, te doprinosi njihovoj konačnoj čvrstoći, izbor agregata u cementnoj smjesi ima najveći utjecaj na njihovu konačnu čvrstoću, silu sloma i vremenskom periodu od trenutka nanošenja sile do trenutka sloma, što je dokazano laboratorijskim ispitivanjem po normi HRN EN 196-1 na vlak (savijanje) i tlak.

Ključne riječi: cement, voda, sirovine, vapnenac, lapor, portland cement, održivi cement

## **SUMMARY:**

Cement is a type of binder used in the construction industry to connect composite materials such as sand, gravel and water for the purpose of making materials used in construction. The main function of cement is to create a solid joint between the components of composite materials for construction, which then serve to form structural elements such as foundations, columns and walls. The history of cement goes back thousands of years. In Croatia, cement production developed during the 20th century. Cement factories, such as the factory in Rugvica near Zagreb, played an important role in the development of the construction industry and infrastructure in the country. The largest cement companies in Croatia are CEMEX Hrvatska d.d., NEXE group and Holcim d.o.o.. The Croatian cement industry today produces different types of cement and special types of cement with different properties. Sustainable cement production is a concept that is increasingly prominent in the construction industry. The production of traditional cement usually generates significant amounts of greenhouse gases such as carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and others, and in this way contributes to the reduction of emissions, the processing of waste building materials that are reused and ultimately the preservation of the environment. Although cement has its role in the production of concrete and cement mortar, and contributes to their final strength, the choice of aggregates in the cement mixture has the greatest impact on their final strength, breakdown force and the time period from the moment of application of force to the moment of breakdown, which is proven by laboratory testing according to HRN EN 196-1 on the train (bending) and pressure.

Key words: cement, water, raw materials, limestone, marl, portland cement, sustainable cement

## **1. UVOD**

Cement je hidraulično vezivo koje se koristi u građevinskoj industriji u visokogradnji i niskogradnji za povezivanje komponenti u građevinskim materijalima. Formira čvrst i trajni spoj između različitih građevinskih komponenti. Osnovne komponente cementa su silicij (silicijev dioksid,  $\text{SiO}_2$ ), aluminij (aluminijev oksid,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), vapno (kalcijev oksid,  $\text{CaO}$ ), željezo (željezov oksid,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Izuzevši osnovne komponente, cement može sadržavati različite aditive poput gipsa (kalcijev sulfat) koji se upotrebljava za reguliranje vremena vezivanja i skupljanja cementa. Važno je naglasiti da sastav cementa može varirati ovisno o proizvođaču i vrsti cementa. Ovisno o specifičnim namjenama i uvjetima primjene koriste se cementi s različitim formulacijama. Najvažniji od njih je portland cement.

Cilj ovog rada je predstaviti proizvodnju cementa, bitne karakteristike cementa, ukratko opisati tvrtke u Republici Hrvatskoj koje se bave proizvodnjom cementa, te predstaviti bližu budućnost proizvodnje ekološki prihvatljivog održivog cementa. Prikazana je i važnost izbora agregata kod miješanja cementnog morta, te utjecaj na mehanička svojstva nakon očvršćavanja.

## **2. O CEMENTU**

Cement je ključni građevinski materijal koji se koristi za izradu betonskih mješavina, stvaranje čvrstih i trajnih konstrukcija poput kuća, stambenih zgrada, komercijalnih objekata, brana, mostova i infrastrukture. Isto tako cement se koristi pri izradi predgotovljenih betonskih elemenata koji se upotrebljavaju u vodogradnji, cestogradnji i drugdje. Proizvodi se kalcinacijom vapnenca i gline te se koristi kao vezivo u betonu i drugim građevinskim konstrukcijama. Pri doticaju s vodom se očvršćava, bilo da je pod vodom ili u zraku, jer reakcijom s vodom proizvodi stabilan i nepotopivi proizvod. Razlikuje se od nehidrauličkih ljepila (vapno, glina i gips) koja se očvršćuju i kombiniraju pri doticaju s vodom na zraku, po tome što isti ne mogu ostati stabilni u vodi te postići krutost. Ključan je sastojak betona, koji je jedan od najčešće korištenih građevinskih materijala. [1,2]

Jedna od najvažnijih karakteristika cementa je njegova trajnost i visoka čvrstoća. Također je otporan na vremenske uvjete i vatru. Omogućava građevinama da budu stabilne i sigurne. [1]

Cement se dijeli u dvije kategorije prema svom mineralnom sastavu, a to su silikatni cement kojeg po svom sastavu glavni mineral klinkera dijelimo na čisti portland cement, portland cement s aditivima, bijeli cement, matalurški cement, pucolanski cement i miješani cement. Isto tako po mineralnom sastvu postoji i aluminatni cement koji uključuje većinu silikatnih cemenata i cemente posebne namjene (specijalni cementi) koje dijelimo na cement niske toplinske hidratacije, cement otporan na sulfate, aluminatni cement i bijeli cement. [1,3]

### **2.1. Povijest nastanka cementa**

Razvoj cementa ima dugu povijest koja seže unatrag tisućama godina. Prva smjesa materijala, vrlo slična cementu kojeg danas upotrebljavamo koristili su stari Egipćani. Za izgradnju piramida, hramova i drugih monumentalnih građevina koristili su smjesu vapnenca i gline. Rimljani su također koristili sličan materijal za građevinsku namjenu poznat kao "pozzolana", cement izrađen od vulkanskog pepela i vapnenca. U srednjem vijeku nakon pada Rimskog carstva, dosadašnje tehnike izrade cementa se više ne koriste, gradnja se bazira na druge materijale poput kamena i opeke. U 18. i 19. stoljeću, s razvojem industrijske revolucije, dolazi

do značajnih inovacija u proizvodnji cementa. Godine 1824. engleski izumitelj Joseph Aspdin (Slika 1.) patentirao je Portland cement koji je postao dominantan materijal u građevinskoj industriji zbog svoje visoke čvrstoće i trajnosti. Tijekom 20. stoljeća modernizira se proizvodnja cementa pomoću rotacijskih peći i boljom kontrolom nad sastavom sirovina što omogućava proizvodnju visokokvalitetnog cementa u velikim količinama. U modernom, suvremenom dobu teži se k razvitku održivijem i ekološki prihvatljivijem cementu s nižim udjelom ugljika ili cementi temeljeni na novim tehnologijama. Također se radi na poboljšavanju energetske učinkovitosti proizvodnje cementa i smanjenju emisija štetnih plinova. [4]



*Slika 1. Engleski izumitelj V. Aspdin [2]*



*Slika 2. Prve mašine za pakiranje cementa, Španjolska [2]*

Prva tvornica cementa (Slika 2.) izgrađena je 1846. Lafarge je počeo proizvoditi cement 1868. S ovim bržim i jednostavnijim proizvodnim metodama, količina upotrijebljenog cementa dramatično se povećala. [4]

### **3. PROIZVODNJA CEMENTA**

Proizvodnja cementa uključuje nekoliko osnovnih faza i koraka do gotovog proizvoda kojeg koristimo pri upotrebi i ugradnji, a to su eksploatacija sirovina, drobljenje i miješanje, peć za kalcinaciju, mljevenje klinkera, pakiranje i distribucija. Postoje različite vrste cementa koje mogu zahtijevati dodatne korake ili promjene u procesu proizvodnje.

#### **3.1. Proizvodni proces cementa**

Glavne sirovine koje se koriste u proizvodnji cementa su vapnenac i glina. Vapnenac se obično dobiva iz kamenoloma, dok se glina može nalaziti na licu mjesta ili se odvozi iz drugih izvora. Ponekad se koriste i druge sirovine poput pijeska, šljunka i mulja.

Pripremu sirovine potrebno je odraditi prije nego što uđu u peć za kalcinaciju. Vapnenac i glina se drobe u manje komadiće, a zatim se miješaju u određenom omjeru kako bi se posigao željeni kemijski sastav.

Postupak kalcinacije počinje na način da se pomiješane sirovine šalju u rotacijske peći u kojima se postiže vrlo visoka temperatura, obično između 1400 i 1500 °C. Visoke temperature uzrokuju kemijske reakcije u kojima vapnenac i glina formiraju klinker. Klinker je tamnosivi materijal koji se sastoji od sitnih kuglica.

Nakon kalcinacije, klinker se iz peći hladi i zatim se melje u fini prah. Mljevenje se obično provodi u cementnim mlinovima koji sadrže valjke ili kuglične mlinske sustave. Mljevenjem se povećava površina klinkera, što poboljšava njegovu reaktivnost s vodom tijekom hidratacije. U procesu mljevenja klinkera mogu se dodati određeni dodaci kako bi se poboljšala kvaliteta cementa. Ti dodaci mogu uključivati gips, koji regulira vrijeme vezanja cementa, ili druge aditive koji poboljšavaju obradivost, trajnost ili druge karakteristike cementa.

Nakon mljevenja i dodavanja aditiva, cementni prah se pakira u vreće ili se transportira u rasutom stanju. Pakirani cement se distribuira na građevinske lokacije ili šalje u trgovine građevinskog materijala na prodaju. [2,5]

Važno je napomenuti da proizvodnja cementa može biti energetska i resursno zahtjevna te da može pridonijeti emisijama stakleničkih plinova. Industrija cementa kontinuirano radi na

razvoju i primjeni inovacija kako bi smanjila svoj ekološki utjecaj, uključujući poboljšane tehnologije kalcinacije, korištenje alternativnih goriva i korištenjem prerađenih otpadnih materijala.

### **3.1.1. Sirovine za proizvodnju cementa**

Sirovine za proizvodnju cementa su ključni elementi u građevinskoj industriji koji omogućuju stvaranje čvrstih i izdržljivih građevinskih materijala. Primarne mineralne sirovine za proizvodnju cementa su vapnenac i glina, a uz njih postoje i različiti dodatci kao što je lapor, boksit, pijesak, tuf, gips, željezna ruda itd. Kako bi poboljšali otpornost cementa pri dugotrajnom izlaganju vode, čvrstoću, otpornost na vlak i tlak, vijek trajanja i druge karakteristike cementa u njega dodajemo materijale kao što su otpadci iz drugih industrija (npr. mljeveni klinker), pepeo iz termoelektrana i silicijevu trosku. Upotreba dodataka također može smanjiti količinu primarnih sirovina potrebnih za proizvodnju cementa i smanjiti negativni utjecaj na okoliš. [1,3,4]

Jedna od glavnih sirovina za proizvodnju cementa je vapnenac. Sadrži visoki udio kalcijevog karbonata ( $\text{CaCO}_3$ ). Vadi se iz kamenoloma i koristi se kao primarni izvor kalcija u cementnoj proizvodnji. Kalcijev karbonat u vapnencu dolazi do izražaja kroz kemijske promijene tijekom procesa proizvodnje cementa, kada je temperatura u peći viša od  $900\text{ }^\circ\text{C}$ , što rezultira stvaranjem kalcijevog silikata, aluminijevog silikata i željeznog oksida koje su ujedno i glavne komponente Portland cementa. Vapnenac je važan jer oslobađa kalcijev karbonat potreban za reakcije koje omogućavaju očvršćavanje cementa i dobivanje željenih mehaničkih svojstva. [3,5]

Druga važna sirovina u proizvodnji je glina. Bogata je aluminijem i silicijem, ključnim elementima potrebnim za formiranje silikatnih spojeva tijekom procesa proizvodnje cementa. Poput vapnenca, glina se vadi iz kamenoloma i koristi kao drugi glavni sastojak cementa. Pravilan omjer između vapnenca i gline važan je za postizanje željenog kemijskog sastava cementa i optimalnih svojstava. [3,5]

Osim vapnenca i gline, dodaci se također koriste u proizvodnji cementa kako bi se poboljšale određene karakteristike materijala (Tablica 1. i 2.) Dodaci mogu uključivati otpatke iz drugih

industrija, poput mljevenog otpadnog materijala (mljeveni klinker), pepeo iz termoelektrana i silicijevu trosku. Ti dodaci poboljšavaju otpornost na vodu, radnu sposobnost, vijek trajanja u druge karakteristike cementa. Upotreba dodataka također može smanjiti količinu primarnih sirovina potrebnih za proizvodnju cementa i smanjiti negativan utjecaj na okoliš. [3,5]

Tablica 1. Četiri osnovna minerala koji čine klinker [1]

Naziv minerala	Približna kemijska formula	Zapis u obliku oksida <sup>3</sup>	Zapis u kemiji cementa <sup>4</sup>	Udio u portland klinkeru [%]
Alit	$\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ trikalcijev silikat	$3\text{CaO}\times\text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	45 - 75
Belit	$\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ dikalcijev silikat	$2\text{CaO}\times\text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	7 - 32
Aluminat	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ trikalcijev aluminat	$3\text{CaO}\times\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	0 - 13
Ferit	$2(\text{Ca}_2\text{AlFeO}_5)$ tetrakalcijev alumino-ferit	$4\text{CaO}\times\text{Al}_2\text{O}_3\times\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$	0 - 18

Tablica 2. Primjer kemijskog sastava sirovina za portlanski klinker [1]

Komponenta	Udio u rovnoj sirovini [%]			Udio u miješanoj sirovini [%]
	Vapnenac	Lapor	Boksit	
$\text{SiO}_2$	0,77	30,51	14,61	13,58
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0,26	3,60	50,81	3,87
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,3	2,24	20,04	1,83
CaO	54,09	32,00	0,35	42,45 (76,5 $\text{CaCO}_3$ )
MgO	0,91	1,08	-	1,27
$\text{TiO}_2$	-	-	2,10	0,18

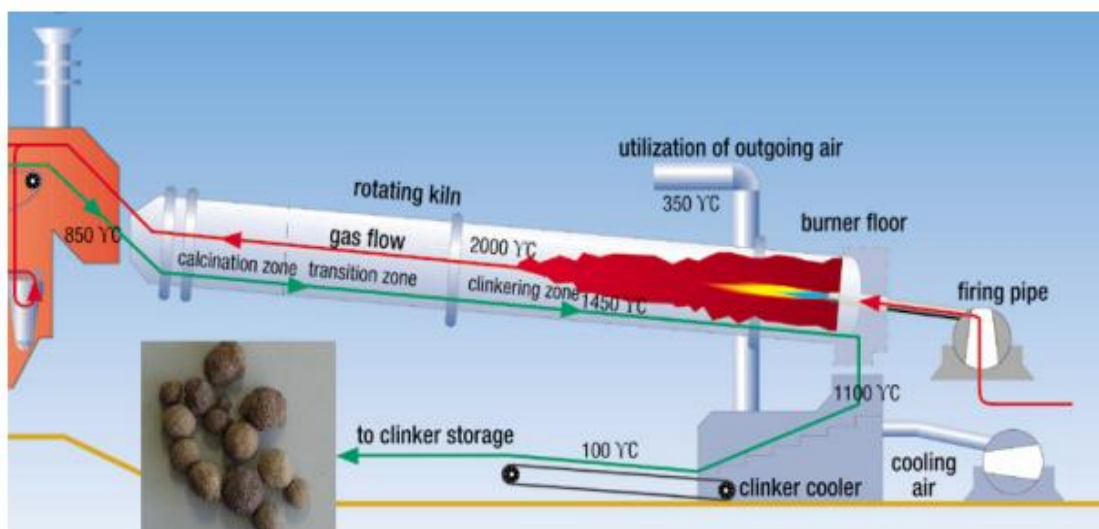
### 3.1.2. Proizvodnja klinkera u rotacijskoj peći

Rotacijska peć ima složenu strukturu i opremljena je sustavima za kontrolu temperature i protoka zraka kako bi se osigurao optimalan proces kalcinacije. Peći se također mogu koristiti za iskorištavanje otpadnih materijala kao alternativnih goriva ili sirovina u proizvodnji cementa,



što može smanjiti potrošnju fosilnih goriva. Loše utječe na okoliš zbog ispuštanja velikih količina emisija CO<sub>2</sub>. Intenzivno se radi na razvoju proizvodnje korištenjem alternativnih goriva i sirovina, na povećanju energetske učinkovitosti, te na novim recepturama novih vrsta cementa kako bi se što manje smanjila emisija CO<sub>2</sub>. [4,5]

Proces proizvodnje je prikazan na Slici 3. Vapnenac i glina, glavne sirovine za proizvodnju cementa, drobe se i miješaju u određenim omjerima kako bi se postigao željeni kemijski sastav. Ostale sirovine, poput pijeska, šljunka ili mulja, mogu se također dodavati prema potrebi. Pripremljene sirovine prenose se na vrh rotacijske peći. Peć je cilindrična konstrukcija koja je nagnuta pod određenim kutem. Sirovine ulaze na vrhu peći i postupno se spuštaju prema dnu duž rotacijske peći. Na početku peći nalazi se zona sušenja. U ovoj fazi, toplina se primjenjuje na sirovine kako bi se uklonila većina vlage. Sušenje pomaže u sprječavanju pucanja ili eksplozija sirovina tijekom daljnjeg procesa zagrijavanja. Kada sirovine dosegnu zonu kalcinacije, koja se nalazi u srednjem dijelu peći, postupno se zagrijevaju na vrlo visoke temperature, na više od 1400 stupnjeva Celzijusa. Kalcinacija je kemijska reakcija u kojoj se sirovine pretvaraju u klinker. Uz pomoć gorionika, prirodni plin, mazut ili druge tvari se koriste za održavanje visoke temperature. Nakon kalcinacije, klinker se brzo hladi kako nebi došlo do previše izmjena i pomaže u postizanju željenih svojstava cementa. Nakon hlađenja, klinker se melje kako bi se dobio fini prah te se pakira u vreće ili u silose spreman za korištenje (Slika 4.). [1,2,4]



Slika 3. Proces proizvodnje klinkera u rotacijskoj peći [1]

Ovo nije jedini način proizvodnje cementa. Može se razlikovati po vrstama peći, predgrijaču i predkalcinatoru, vrsti hladnjaka, suhom stanju ili vlažnim uvjetima suspenzije. Načini proizvodnje cementa mogu varirati i ovisno o tehnologiji i opremi koja se koristi u cementnim postrojenjima. Važno je napomenuti da se u svim fazama proizvodnje cementa mogu primijeniti određene tehnologije za smanjenje emisija stakleničkih plinova i povećanja energetske učinkovitosti, kao što su sušenje sirovina, korištenje alternativnih goriva i korištenje postupaka za odvajanje i iskorištavanje CO<sub>2</sub>. [2,4]

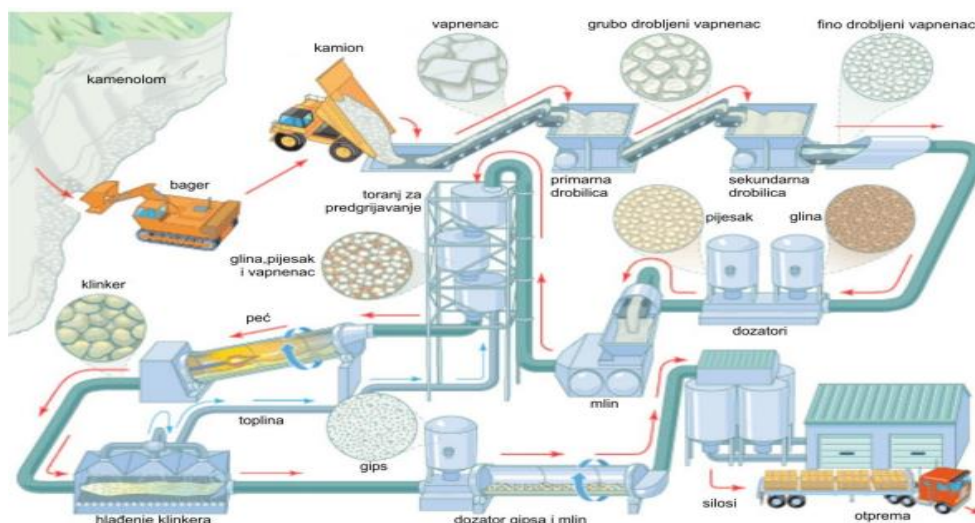


*Slika 4. Mljevenje klinkera, unutrašnjost mlina s kuglama [1]*

Postoje i drugi procesi proizvodnje cementa, koji su drugačiji upravo po gore navedenim odjeljcima (vrsta peći, predgrijač i predkalcinator, vrsta hladnjaka i suho stanje ili vlažni uvjeti suspenzije). Prvi proces proizvodnje cementa bio je mokra metoda, u kojoj voda i suspenzija sirovine ulazi u peć izravno bez prethodnog zagrijavanja. Njegova prednost je u tehnologiji jednostavnosti miješanja sirovina u obliku vodene suspenzije. Ovaj postupak se ne koristi zbog niske energetske učinkovitost. Velika količina energije se troši u mokrom procesu isparavanja vode iz suspenzije, a toplina koja je nastala prilikom hlađenja klinkera se ne iskorištava u tornju za predgrijavanje. Iz specifične potrošnje energije svakog proizvodnog procesa, kako je prikazano na Slici 5. vidljivo je da suvremene metode imaju značajno veću energetske učinkovitost (Slika 6.). [1]

SUSTAV PEĆI	SPECIFIČNA POTROŠNJA GORIVA (MJ/toni klinkera)
Mokri (konvencionalni)	6000 do 6500
Suhi postupak u dugoj peći	do 5000
Suvremeni mokri i polu-mokri postupak (predgrijač i predkalcinator)	4000 do 4800
Polu-mokri (roštiljni predgrijač)	3700
Polu-suhi (roštiljni predgrijač)	3300
Suhi (predgrijač)	3500 do 4000
Suhi (predgrijal i predkalcinator)	2900 do 3300
Teorijska toplina reakcije	1700 do 1800

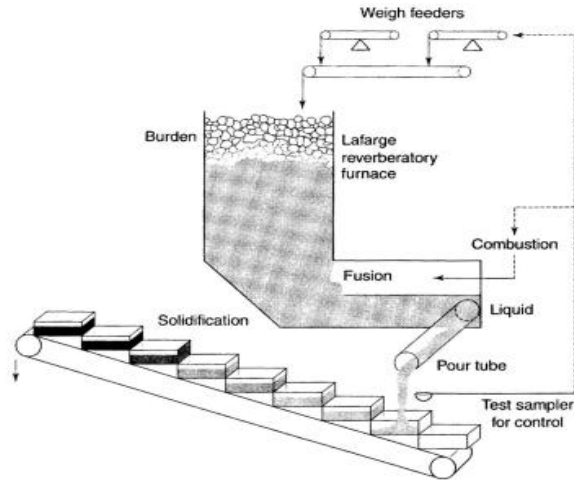
Slika 5. Potrošnja energije ovisno o postupku proizvodnje cementa [1]



Slika 6. Moderni postupak pri proizvodnji cementa [1]

### 3.1.3. Vertikalne peći

Vertikalne peći se upotrebljavaju za proizvodnju cementa kada nema potrebe za mljevenjem sirovina, samo za drobljenjem jer se klinker tvori taljenjem (slika 7). U rotacijskoj peći sinteriranje fino mljevenog praha igra vodeću ulogu u stvaranju klinkera. Vertikalne peći upotrebljavaju se za proizvodnju određenih vrsta posebnog cementa, među kojima su aluminati, a nazivaju se i boksitni cement). [1,5]



Slika 7. Proces proizvodnje cementa u verikalnoj peći (lijevo), klinker dobiven taljenjem (desno) [1]

#### 4. SVOJSTVA I VRSTE CEMENTA

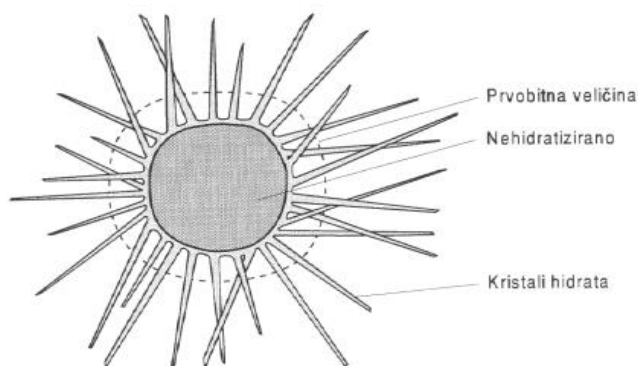
Zbog raznolikog izbora vrste, klase i namjene cementa postoje službeno određene oznake koje se upotrebljavaju pri spravljanju, nabavi ili drugoj potrebi, kao što su na Slici 8.

Oznaka npr: CEM II/A-M (S-V-L) 32,5 R		Značenje
Vrsta cementa	CEM I	čisti portland cement
	CEM II	portland cement s dodacima
	CEM III	metalurški cement
	CEM IV	pucolanski cement
	CEM V	miješani cement
Mješavina mineralnih dodataka	M	ako u oznaci postoji M, cement sadrži mješavinu dodataka a u suprotnom samo jedan dodatak
Količina mineralnih dodataka	A	6 – 20 %
	B	21 – 35 %
Vrsta mineralnih dodataka	S	zgura visoke peći
	V	leteći pepeo pucolanskih svojstava
	VV	leteći pepeo pucolanskih i hydr. svojstava
	T	škrljevac pečen na oko 800 °C
	L	vapnenac s najviše 0,50 % ugljika organskog porijekla
	LL	vapnenac s najviše 0,20 % ugljika organskog porijekla
	P	prirodni pozolan (tufovi)
	Q	prirodni pucolan termički obrađen
	D	filtrarski prah
Klasa cementa	32,5	tlačna čvrstoća nakon 28 dana (MPa)
	42,5	
	52,5	
Prirast čvrstoće	N	normalni
	R	visoka rana čvrstoća

Slika 8. Oznaka vrste i klase cementa [1]

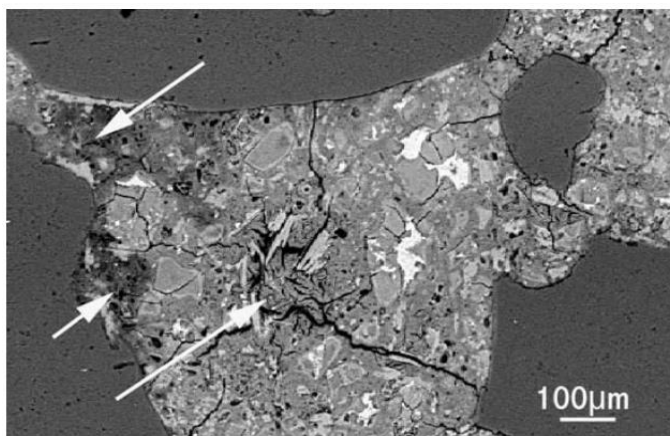
#### 4.1. Svojstva i vrste silikatnog cementa

Silikatni cement je jedna od glavnih vrsta cementa koji se koristi u građevinskoj industriji. Ova vrsta cementa temelji se na silikatima, spojevima koji se formiraju iz reakcije kalcijevog silikata s vodom. Na Slici 9 je prikazan razvoj etringita kada sulfatni ioni reagiraju s kalcijevim ionima prisutnima u cementu tijekom procesa hidratacije. Ovaj mineral može utjecati na svojstva cementa i može dovesti do problema s trajnošću i izdržljivošću betonskih konstrukcija ako nije kontroliran tijekom proizvodnje cementa.[1]



Slika 9. Kristalizacija etringita [1]

Svojstva silikatnog cementa, uključujući čvrstoću, stvrdnjavanje, otpornost na kemikalije, otpornost na visoke temperature, radnu sposobnost i adheziju, čine ga ključnim materijalom u građevinskoj industriji. [6]



Slika 10. Sulfatna korozija cementnog kamena [1]

Silikatni cement ima visoku čvrstoću, što ga čini pogodnim za građevinske konstrukcije koje zahtijevaju izdržljivost i otpornost na opterećenje. Ima relativno brzo vrijeme očvršćavanja i razvoj početne čvrstoće što omogućava ubrzane građevinske procese i brzu uporabu materijala. Otpornost na kemikalije ga čini prikladnim za građevinske zahtjeve u okruženjima gdje su prisutne kemikalije ili agresivne tvari (Slika 10). Dobru otpornost na visoke temperature pa se može koristiti pri izgradnji peći ili industrijskih peći. Ima dobru sposobnost obrade, što olakšava miješanje i oblikovanje tijekom izvođenja građevinskih ili umjetničkih radova. Dobre adhezije što znači da prijanja na mnogo različitih materijala i ima široku upotrebu. [3,6]

Cement osim što se odupire agresivnim uvjetima, prilagođavanjem sastava klinkera može imati poboljšana druga svojstva. Zahvaljujući nižem omjeru aluminatne faze i alita, cement ima nižu toplinu hidratacije zbog toga što upravo ti minerali oslobađaju najviše topline. Cement koji sadrži više alita dobiva veću ranu čvrstoću (Slika 11.). [1]

	Tip cementa			
	A	B (%)	C	D
CaO	66	65	62	61
SiO <sub>2</sub>	23	21	25	21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6	5	5	4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2	3	2	7
C <sub>2</sub> S	34	21	59	31
C <sub>3</sub> S	41	50	17	40
C <sub>3</sub> A	13	9	9	0
C <sub>4</sub> AF	5	9	6	20

A - normalni cement  
 B - cement ranih čvrstoća (+ sitnija meljava)  
 C - cement niske topline hidratacije  
 D - sulfatno otporni cement

Slika 11. Sastavi klinkera silikatnog cementa [1]

Vrste silikatnog cementa: [5,6]

Portland silikatni cement (PSC)

Najčešća vrsta silikatnog cementa koja se koristi u građevinskoj industriji. Sastoji se od kalcijevog silikata (C3S) i manje količine kalcijevog aluminat silikata (C2AS). Ima visoku čvrstoću, brzo stvrdnjava i omogućava brz razvoj početne čvrstoće. Koristi se za razne građevinske konstrukcije uz beton i mort ali u i završnim radovima.

Aluminatni silikatni cement (ASC)

Sadrži veću količinu kalcijevog aluminat silikata (C2AS) u odnosu na kalcijev silikat (C3S). Ima visoku početnu čvrstoću i brzo stvrdnjava, ali se također brže troši tijekom vremena u usporedbi s drugim vrstama cementa. Često se koristi u hitnim poravcima i sanacijama.

Slag silikatni cement (SSC)

SSC se proizvodi se miješanjem portland cementa s dodatkom drobljenog željeza ili bakrenog oksida. Ima veliku otpornost na kemikalije i povišene temperature u usporedbi s drugim vrstama cementa. Često se koristi u konstrukcijama koje su izložene kemijskim i termičkim utjecajima, poput industrijskih postrojenja i postrojenja za obradu otpada.

#### **4.2. Svojstva i vrste aluminatnog cementa**

Aluminatni cement posebna je vrsta hidrauličkog veziva koji se koristi u građevinskoj industriji. Proizvodi mljevenjem klinkera, dobivenog sinteriranjem ili taljenjem. Njegova osnovna karakteristika je visoka sposobnost stvrdnjavanja čak i pri niskim temperaturama. Značajno se razlikuje od silikata u mineralnom i kemijskom sastavu (Slika 12). Osnovni mineral je monokalcijev aluminat (CA) sa sadržajem većim od 45%. [1]

	High-Alumina Cement		
	Low Iron (CAC50) <sup>†</sup>	High Iron (CAC40) <sup>‡</sup>	Portland Cement
Calcium oxide	34–40	30–40	58–67
Silica	4–6	3–6	19–26
Alumina	50–57	38–56	4–11
Iron oxide	1–3	10–18	2–5
Titania	0.5–2.5	0.5–2.0	0.5–1.0
Magnesia	0–1	0–1	0–5
Sulfur trioxide	0–1	0–1	0–2.5

Source: Andrews 1984.  
\* All values are in weight percent.  
<sup>†</sup> Medium-grade calcium aluminate cement.  
<sup>‡</sup> Low-grade calcium aluminate cement.

Slika 12. Kemijski sastav silikatnog i aluminatnog klinkera [1]

Svojstva i vrsta silikatnog cementa ovise o postupku proizvodnje (taljenje, sinteriranje, kalciniranjem itd.) i upotrebom sirovinama. Većina cementa nastaje taljenjem boksita i vapnenca. Aluminijski cementa nastaje taljenjem boksita i vapnenca. Cement se proizvodi u malim količinama i ima visok udio aluminata, a u procesu sinteriranja koristi glinicu umjesto boksita. Cement s visokim sadržajem glinice označen je i razvrstan prema omjeru aluminata, među kojima je osnovna oznaka KAC (kalcijev aluminatni cement) nakon čega slijedi broj sadržaja aluminata. Dijelimo ga na tri osnovne skupine, a to su cement s niskim sadržajem (npr. KAC 40), cement sa srednjim sadržajem aluminata (npr. KAC 50) i cement s visokim sadržajem aluminata (npr. KAC 70) (Slika 13.) [1]

Vrsta	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> % (KAC)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	SiO <sub>2</sub> %	CaO %	Proizvodni proces	Boja
visok sadržaj željezo-oksida (standard)	nizak udio aluminata 36 – 42	12 – 20	3 – 8	36 - 42	taljenje	tamno siva
niskisadržaj željezo-oksida	srednji udio aluminata 48 – 60	1 – 3	3 – 8	36 - 42	taljenje/ sinteriranje	svjetlo siva
bez željezo-oksida	visoki udio aluminata 65 – >80	0 – 0,5	0 – 0,5	17 – 27	sinteriranje	bijela

Slika 13. Klase aluminatnog cementa [1]



Aluminatne cementne skupine prema kemijskom sastavu (sadržaju oksida), rezultirajućoj boji i procesu proizvodnje cementa očitavamo iz tablice 8. Primjena taljenja cementa do 50% sadržaja aluminata, uključujući cimente niskog i cimente srednjeg omjera aluminata, dok se cementi koji posjeduju visok omjer aluminata proizvode samo preko procesa sintetiziranja. [1]

Zahtjevi kakvoće aluminatnih cementnih sirovina povezani su s kemijskim sastavom odnosno omjerom oksida u smjesi. U procesu taljenja, izuzevši njihov kemijski sastav postoje i zahtjevi za raspodjelu veličine čestica, mineralnog sastava i vlažnosti. Ti zahtjevi proizlaze iz načela rada vertikalne peći, u kojoj se sirovine ne melju unaprijed, koriste se čestice od 50 do 100 mm. Tipične vrijednosti navedenih parametara za cement s niskim i srednjim sadržajem aluminata nalazi se na Slici 14. [1]

Parameter	High-Alumina Cement	
	Low Iron (CAC50)*	High Iron (CAC40)†
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :SiO <sub>2</sub>	10:1 (minimum)	10:1 (minimum)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20:1 (minimum)	2.0–2.5:1 (preferred)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :TiO <sub>2</sub>	16:1 (minimum)	na‡
Mineralogy	Not critical	Boehmite or diaspore
Free moisture	Preferred dry	5 wt % (preferred maximum)
Particle size	Not critical	50–100 mm

Source: Andrews 1984.  
 \* Medium-grade calcium aluminate cement.  
 † Low-grade calcium aluminate cement.  
 ‡ na = not available.

Slika 14. Zahtjevi kvaliteta sirovina [1]

Najbitnija svojstva ove vrste cementa su vrlo visoka početna čvrstoća i brzo stvrdnjavanje, što omogućava brzu daljnju upotrebu izvedenog dijela, površina dostupna za rad. Visoka čvrstoća, pa je tako pogodan za primjenu u građevinskim konstrukcijama s visokim zahtjevima za izdržljivošću i otpornošću na opterećenje. Aluminatni cement je otporan na djelovanje kiselina, što ga čini pogodnim za primjenu u okruženjima gdje postoji izloženost kiselinama, poput industrijskih prostrojenja ili otpadnih voda. Jedno od ograničenja aluminatnog cementa je njegova niska otpornost na sulfat. U prisutnosti sulfata, aluminatni cement može ispoljiti ekspazivne reakcije i smanjiti svoju čvrstoću. Zbog toga se ne preporučuje ta upotrebu u kruženjima s visokom koncentracijom sulfata. [5,6]

Postoje različite vrste aluminatnog cementa koje se koriste u građevinskoj industriji. Koristi se pri proizvodnji vatrostalnog betona, blokova i ljepila u kalupima na visokim temperaturama od 1200 °C do 1500 °C. Za obloge otporne na koroziju, sulfate, abraziju i kiselinu. Pogodan je upotrebu pri izradi samonivelirajućeg poda. Neke od najčešćih vrsta su: [5,6]

#### Standardni aluminatni cement

Upotrebljava se za razne građevinske konstrukcije u kombinaciji s betonom, mortom, injektiranja i slično.

#### Aluminatni cement s dodatkom gipsa

Ova vrsta cementa ima produženo vrijeme stvrdnjavanja i koristi se za konstrukcije gdje je potrebno sporije stvrdnjavanje.

#### Brzovezajući aluminatni cement

Ova vrsta ima vrlo brzo stvrdnjavanje i koristi se u situacijama gdje je potrebna hitna intervencija, poput hitnih popravaka.

### **4.3. Održivi i ekološki cement**

Održivi i ekološki cementi slični su koncepti koji se bave smanjenjem negativnog utjecaja cementne industrije na okoliš, ali postoje razlike u njihovim značenjima. Održivi cement je širi pojam koji se odnosi na cement koji pridržava sveobuhvatnije održive prakse u cementnoj industriji. Može uključivati različite aspekte održivosti, uključujući ekološku, ekonomsku ili socijalnu dimenziju. Osim smanjenja ekološkog otiska, održivi cement također može uzimati u obzir ekonomske i društvene faktore, kao što su ekonomska pristupačnost, društvena odgovornost i pozitivan utjecaj na lokalne zajednice. Ekološki cement je specifičnija kategorija koja se fokusira isključivo na smanjenje negativnog utjecaja cementne proizvodnje na okoliš. Naglasak ekološkog cementa je na smanjenju emisija ugljičnog dioksida (CO<sub>2</sub>) i drugih onečišćivača tijekom proizvodnje. Osim smanjenja CO<sub>2</sub> emisija, ekološki cement može također koristiti alternativne sirovine i tehnologije za smanjenje ekološkog oštećenja. [7]

Ekološki cement je podskup održivog cementa, jer se bavi specifičnim ekološkim aspektima održivosti, dok održivi cement može obuhvaćati širi raspon održivih praksi koje uključuju ekološke, ekonomske i društvene dimenzije. Oba koncepta su usmjerena na stvaranje održivijeg

okoliša i industrije građevinskih materijala. [7]

Važno je napomenuti da se različiti proizvođači mogu koristiti različitim metodama i sirovinama kako bi stvorili svoje verzije održivog i ekološkog cementa. Stoga se mogu razlikovati u svojim specifičnim karakteristikama i performansama. [8]

Postoje razni certifikacijski programi i standardi koji ocjenjuju održivost cementa. Jedan od njih je LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) koji ocjenjuje performanse građevinskih materijala i njihov utjecaj na okoliš, uključujući cement. [8]

#### **4.3.1. Značajke održivog i ekološkog cementa**

Tijekom proizvodnje održivog i ekološkog cementa koriste se napredne tehnologije koje smanjuju emisiju CO<sub>2</sub>. Ovo se postiže korištenjem alternativnih sirovina kao što je pepeo iz termoelektrana, koji zamjenjuje dijelom tradicionalan materijal poput vapna. Osim toga, neki moderniji postupci proizvodnje mogu značajno smanjiti emisiju CO<sub>2</sub> tijekom same reakcije vezivanja cementa. Pri proizvodnji koriste se građevinski otpadni materijali (šljaka, staklo, pepeo iz termoelektrana itd.) kao dio svojih sirovina. Na ovaj način ne samo da se smanjuje potreba za eksploatacijom prirodnih resursa, već i smanjuje količinu otpada koji završava na odlagalištima. Mogu imati bolje karakteristike trajnosti u usporedbi s tradicionalnim cementom, što znači da građevine ili infrastrukturni projekti koji koriste održivi i ekološki cement mogu imati dulji vijek trajanja i smanjenu potrebu za popravcima ili zamjenom. Održivi cement promiče održivu upotrebu u građevinskim projektima, uključujući pravilno održavanje, obnovu i recikliranje materijala, nakon kraja vijeka trajanja konstrukcije. Osim ekološke održivosti, održivi cement također uzima u obzir ekonomske i društvene faktore, ekonomsku pristupačnost, društvenu odgovornost i pozitivan utjecaj na lokalne zajednice. Proces proizvodnje ekološkog cementa može uključivati učinkovito upravljanje vodom i energijom, što bitno smanjuje ekološki otisak. [8]

#### **4.3.2. Održivi i ekološki cement u Hrvatskoj**

U Hrvatskoj postoje inicijative u istraživanja vezana za održivi i ekološki cement, kao i održive

građevine. I dalje se najvećim djelom u Hrvatskoj koristi klasičan tradicionalan cement no postoji svijest o važnosti održivosti i ekoloških aspekata građevinske industrije. Jedna od inicijativa je promocija korištenja alternativnih sirovina u proizvodnji cementa kao što je pepeo iz termoelektrana kao zamjene za dio tradicionalnih sastojaka cementu. Ova praksa smanjuje ovisnost o eksploataciji prirodnih resursa i smanjuje količinu otpada. [9]

Istraživački centri, sveučilišta i tvrtke u Hrvatskoj provode istraživanja o novim vrstama održivog i ekološkog cementa, kao što su geopolimerni cement ili cement na bazi silicija. Cilj je razviti inovativne materijale koji imaju manji utjecaj na okoliš, smanjene emisije CO<sub>2</sub> i poboljšane performanse.

Geopolimerni cement je vrsta održivog cementa koji se koristi umjesto tradicionalnih vezivnih materijala poput vapna. Dobiva se iz industrijskih nusproizvoda poput pepela iz termoelektrana ili rudarskog otpada.

Cement na bazi koloidnog silicija, koristi umjesto vapna kao glavni vezivni element. Dobiva se iz vulkanskog pepela ili industrijskih otpadnih materijala. Ima odlične mehaničke karakteristike kao i otpornost na koroziju. [9]

Važno je napomenuti da se usvajanje održivog i ekološkog cementa, kao i ostalih građevinskih materijala, u građevinskoj industriji obično odvija postupno, jer su potrebna ulaganja u istraživanje, razvoj, certifikaciju i prihvaćanje novih materijala. Trend održivosti raste i očekuje se da će se održivi cement i drugi ekološki materijali postati važniji dio građevinskih praksi u budućnosti.

## **5. PROIZVOĐAČI CEMENTA U HRVATSKOJ**

Croatia Cement (Hrvatska udruga tvornica cementa) ekonomski je značajna udruga koja promiče i predstavlja zajedničke ciljeve cementne industrije u Republici Hrvatskoj. Udruga Croatia Cement je osnovana 1953. godine, a djeluje od 1996. godine. Ciljevi udruge su održivost proizvodnje cementa u Republici Hrvatskoj. Nastoje tijekom proizvodnje minimalizirati štetan utjecaj na okoliš, poboljšati sigurnost na radu i pazi se na zdravlje djelatnika. Sudjelovanje u procesu objedinjavanja i usvajanja relevantnih normativnih dokumenata (zakona, standarda,

propisa itd) u vezi sa industrijom cementa. Glavni zadatak udruge je suradnja s institucijama Republike Hrvatske. [10]

Hrvatsku cementnu industriju čine sljedeći proizvođači: [10]

- Tvornica Cemex HRVATSKA d.o.o. iz Kaštel Sućurcu:
  - Sv. Kajo, u pogonu od 1904. godine
  - 10. kolovoz, u pogonu od 1908. godine
  - Sv. Juraj, u pogonu od 1912. godine
- Tvornica NEXE d.d. (član Nexe grupe) iz Našica, u pogonu od 1980. godine
- Tvornica Holcim (Hrvatska) d.o.o. iz Koromačna, u pogonu od 1926. godine
- Tvornica Calucem d.o.o. iz Pule, u pogonu od 1925. godine

Tvornice Cemex HRVATSKA d.o.o., NEXE d.d. i Holcim d.o.o. proizvode portland cement dok Calucem d.o.o. proizvodi aluminatni cement. [10]

### **5.1. CEMEX Hrvatska d.d.**

CEMEX Hrvatska d.d. osnovan je u Meksiku 1906., CEMEX je iz male lokalne proizvodnje kroz više akvizicija izrastao u uspješnu globalnu tvrtku, pružajući zajednicama i kupcima u više od 50 zemalja najkvalitetnije građevinske proizvode i pouzdane usluge. Tvrtka raspolaže s gotovo 44.000 radnih mjesta. CEMEX je na hrvatsko tržište stupio 2005. godine preuzimanjem britanske RMC Grupe, čime je ušao u tvrtku "Dalmacija cement" sa stoljetnom tradicijom proizvodnje cementa. Službenom promjenom naziva u CEMEX Hrvatska, tvrtka je bila u potpunom vlasništvu CEMEX Investments Limited 2008. godine. [11]

Ovom akvizicijom CEMEX je postao vodeći proizvođač cementa u regiji, koja uključuje Hrvatsku, Crnu Goru, Bosnu i Hercegovinu, kao i mnoga druga europska tržišta. CEMEX Hrvatska jedno je od najvećih poduzeća u Hrvatskoj, vodeći izvoznik, važan poslodavac i odgovoran socijalni partner, čije se poslovanje bazira na načelima održivog razvoja i poštivanju najviših etičkih načela. [11]

Certifikati OHSAS 18001, ISO 9001 i 14001, Poslodavac Partner, Dodira Dobrote, DOP-a za sve, Zlatnog ključa, zatim nagrade poput Zlatne kune, Indeksa DOP-a i ostalih, čine samo dio

brojnih priznanja koja je CEMEX Hrvatska kroz stoljetno poslovanje ostvarila zahvaljujući svojim ulaganjima u daljnji razvoj tvrtke. [11]

Proizvodnja cementa i iskopavanje sirovina ima veliki utjecaj na okoliš kojim se odgovorno upravlja u Cemexu: smanjuju se emisije ugljičnog dioksida, poboljšava se energetska učinkovitost, optimizira se potrošnja sirovina i vode, provodi se biološka melioracija i posvećuje se održavanju biološke raznolikosti. Cemex je predan kontinuiranom radu, mjerenju i praćenju na smanjenju štetnih utjecaja na okoliš i poboljšanju učinka na okoliš. [11]

Cemex tvrtka nudi sljedeće vrste cementa: rasuti, uvrećani i vertua cement. [11]

## **5.2. Holcim (Hrvatska) d.o.o.**

Holcim Hrvatska d.o.o. je članica Holcim Grupe, aktivirana u srpnju 2015. godine nastala sjedinjenjem dva vodeća proizvođača u području građevinskog materijala, a to su Holcim i Lafarge. Zapošljavaju oko 70.000 radnika u više od 70 zemalja svijeta. Holcim u Hrvatskoj ima samo jednu tvornicu cementa, dva terminala za cement, tri tvornice betona i četiri kamenoloma agregata. [12]

Projektom ECOPlanet Holcim d.o.o. se zalaže za niskougljičnu gradnju, korištenje eko cementa koji se izrađuje od recikliranog građevinskog otpada i otpada od rušenja. S porastom svjetskog stanovništva i brzom urbanizacijom, rješenja poput ECOPlaneta ključna su za omogućavanje zelenijih gradova i pametnije infrastrukture, gradeći „više s manje“. ECOPlanet profil održivosti je potaknut inovativnim sirovinama s niskim emisijama, uključujući reciklirani građevinski otpad i otpad od rušenja, kalciniranu glinu. Ovakav način proizvodnje cementa je klimatski prihvatljiv upravo i zbog uporabe alternativnih goriva u svom industrijskom procesu. Nudi rješenja za zelenu gradnju, usklađenu s najvišim svjetskim standardima certificiranja održivih zgrada od BREEAMA-a do LEED-a. ECOPlanet je dostupan u Kanadi, Rumunjskoj, Francuskoj, Italiji, Španjolskoj i Njemačkoj, te se nastoji u budućnosti proširiti takav asortiman na što više država. [13]

### **5.3. Nexe Group**

Nexe Grupa je poslovni sustav od 16 tvrtki koje posluju u Republici Hrvatskoj, Bosni i Hercegovini i Srbiji. Osnovna djelatnost je proizvodnja građevinskih materijala kao što su beton, betonske elemente, agregat, cement, crijep, opeku i keramičke pločice. U Grupi se nalaze tvrtke koje se bave lučkim uslugama i gospodarenjem otpada. Sjedište Nexe grupe d.d. se nalazi u Našicama u Republici Hrvatskoj. [14]

Vizija Nexe Grupe je kontinuirano širenje i jačanje svoje pristunosti na tržištima regije te povećanje konkurentske prednosti kroz inovacije i visoku kvalitetu proizvoda. Također je naglasak na održivosti i odgovornosti prema okolišu, kao važne vrijednosti.[14]

## **6. RAZVOJ PROIZVODNJE I PRIMJENE CEMENTA U GRAĐEVINARSTVU**

Razvoj proizvodnje i primjene cementa u građevinarstvu obuhvaća niz inovacija i napretka koju su utjecali na kvalitetu, trajnost, učinkovitost i održivost građevinskih materijala. Proizvodnja cementa doživjela je napredak u tehnologiji i procesima proizvodnje modernizacijom i automatizacijom postrojenja za proizvodnju. Omogućila je poboljšanu kontrolu kvalitete i veću učinkovitost proizvodnog procesa. Primjenom suvremenih sustava nadzora i upravljanja omogućuje preciznije doziranje sastojaka i praćenje parametra proizvodnje, što rezultira konzistentno visokom kvalitetom cementa. [11,12,14]

Postoje različite vrste cementa, od kojih svaka ima svoje specifične karakteristike i primjenu. Razvoj novih vrsta cementa omogućuje prilagodbu materijala različitim zahtjevima građevinskih projekata. Primjeri uključuju cimente otporne na sulfat, brzi cement, visokotlačni cement i cement s niskom toplinskom ekspanzijom. [13]

Proizvodnja betona ima značajan utjecaj na okoliš, posebno zbog emisija CO<sub>2</sub>. Stoga su se razvoj i istraživanje usredotočili na održivost cementne industrije. Uspostavljeni su standardi i certifikacijski sustavi koji promiču održivu proizvodnju cementa, uključujući smanjenje emisija

CO<sub>2</sub>, korištenje alternativnih sirovina i recikliranje otpada.

Pored tradicionalnih cementnih materijala, istraživanje je usmjereno na razvoj novih materijala koji mogu zamijeniti ili poboljšati svojstva cementa. Primjeri uključuju geopolimere, koji se temelje na aktivaciji industrijskog otpada, te materijale koji koriste aktivatore na bazi silicija i aluminijskih oksida. Ovi materijali imaju potencijal za smanjenje emisija CO<sub>2</sub>, veću trajnost i poboljšane mehaničke karakteristike. [8,13]

Digitalizacijom i automatizacijom i njihovom primjenom, poput Building Information Modeling (BIM) i naprednih sustava nadzora, omogućeno je bolje planiranje, projektiranje i upravljanje građevinskim projektima. Ovi alati pružaju preciznije informacije, olakšavaju suradnju između sudionika i pomažu u optimizaciji upotrebe cementa i drugih materijala. [12] Održivost se sve više promiče kroz recikliranje i upravljanje otpadom u cementnoj industriji. Korištenjem otpadnih materijala kao dijela cementne smijese, poput industrijskog otpada ili recikliranog betona, smanjuje potrošnju prirodnih resursa i smanjuje količinu otpada koji završava na odlagalištima. [8]

Primjenom naprednih tehnologija u građevinarstvu optimizira se upotreba cementa i poboljšavaju performanse građevine i njezine konstrukcije. Navedeni pomoci u proizvodnji u proizvodnji i primjeni cementa u građevinarstvu omogućuju izgradnju održivih, sigurnih i visokokvalitetnih građevinskih projekata. [8]

Cement je važan materijal koji se upotrebljava u različitim građevinskim i inženjerskim projektima. Neki od najvažnijih primjena cementa u građevinarstvu: [6]

#### 1. Izrada betona

Cement se koristi za izradu betona, koji je građevinski materijal. Sastojci betona su cement, agregat (pijesak i šljunak) i vode. Kombinacija tih sastojaka omogućuje izradu čvrste i trajne konstrukcije, kao što su temelji, stupovi, ploče, zidovi i drugi elementi građevina.

#### 2. Izrada morta

Cement se koristi za pripremu žbuke (morta), koji se koristi za povezivanje opeka, blokova ili kamenih elemenata prilikom izgradnje zidova ili zidanja. Žbuka se koristi i za popravke



i oblaganje površina.

### 3. Hidrotehničke konstrukcije

Hidraulički cement se koristi za izgradnju struktura koje su izložene vodi, kao što su brane, kanali, tuneli i rezervoari. Ima svojstva koja mu omogućuje da očvrstne i postane izuzetno čvrst, čak i pod vodom.

### 4. Cestogradnja

Cement se koristi u izradi cementnog-tla i cementno-pjeskovitih mješavina koje se koriste za izgradnju prometnica, autoputeva i drugih prometnih infrastruktura. Ove mješavine pomažu u dobivanju čvrste podloge koja je otporna na habanje i opterećenja.

### 5. Sanacija i obnova

Cement se također koristi u postupcima sanacije i obnove postojećih građevina. Može se koristiti za popunjavanje pukotina, oblaganje oštećenih površina ili izravnavanje neraavnih podova.

### 6. Izrada betonskih podova

Cement se koristi za izradu betonskih podova u industrijskim, komercijalnim i stambenim prostorima. Betonski podovi su čvrsti, izdržljivi i lako se održavaju, zbog čega su popularni u raznim okruženjima.

### 7. Izgradnja mostova

Cement se koristi za izgradnju mostova jer pruža čvrstoću i otpornost na različita opterećenja. Mostovi se često grade od armiranog betona, koji kombinira čeličnu armaturu s cementom i agregatima kako bi se postigla veća čvrstoća i izdržljivost.

### 8. Predgotovljeni betonski elementi

Cement se koristi u proizvodnji različitih betonskih elemenata, kao što su betonski blokovi, cijevi, ploče, stupovi i drugi elementi. To su predgotovljeni elementi izrađeni u tvornici koji se kasnije koriste u izgradnji, čime se ubrzava proces gradnje i poboljšava kvaliteta.

### 9. Stabilizacija tla

Cement se koristi za stabilizaciju slabo nosivog tla. Dodavanjem cementa u tlo i miješanjem, postiže se povećanje čvrstoće i stabilnosti tla, čime se omogućava sigurna izgradnja na takvim površinama.

### 10. Injektiranje

Cement se koristi za injektiranje u pukotine i pukotine u građevinama kako bi se popravili

oštećeni dijelovi. Injektirani cement prodire u pukotine i očvršćava, čime se obnavlja čvrstoća i stabilnost konstrukcije.

Važno je napomenuti da postoji nekoliko vrsta cementa, poput običnog portland cementa, bijelog cementa, brzovezujućeg cementa, hidrauličnog cementa i drugih, koji se upotrebljavaju ovisno o situacijama i uvjetima gradnje. Izbor vrste cementa ovisi o specifičnim potrebama projekta i zahtjevima konstrukcije.

## **6.1. Proizvodi od cementa**

Postoji širok raspon proizvoda koji se izrađuju od cementa. Takvi proizvodi proizvode se u tvornicama, što omogućava preciznu, kvalitetnu i masovnu izradu. Gotovo je nemoguće navesti sve proizvode, a ovo su neki od najviše korištenih u visokogradnji i niskogradnji:

### 1. Opeke

Opeke od cementa su popularni građevinski materijali koji se koriste za izgradnju zidova i drugih konstrukcija. Ove opeke su obično većih dimenzija od tradicionalnih zidnih opeka od gline i imaju veću čvrstoću.

### 2. Blokovi

Cementni blokovi su veliki, čvrsti blokovi koji se koriste za uzgradnju zidova, temelja i drugih građevinskih elemenata. Oni su često lakši i brži za postavljanje od tradicionalnih cigli ili kamenih blokova.

### 3. Cijevi

Cementne cijevi se koriste za vodovodne i kanalizacijske sustave. One su izdržljive te otporne na koroziju, čineći ih idealnim za prijenos vode i otpadnih materijala.

### 4. Pločice

Cementne pločice su popularne za oblaganje zidova, podova i drugih površina. Dolaze u različitim oblicima, teksturama, uzorcima i bojama. Izdržljive su te jednostavne za održavanje.

### 5. Cestovni elementi

Cement se koristi za izradu cestovnih elemenata kao što su rubnjaci, slivnici, ploče, mulde. Ovi elementi pružaju podršku i strukturalnu čvrstoću cestama i pomažu u

održavanju prometne sigurnosti.

6. Betonske ploče

Velike ploče od armiranog betona koje se koriste za izradu pločnika, dvorišta, terasa i drugih površina. One su izdržljive, protuklizne, dugotrajne i mogu se oblikovati u različite veličine i oblike.

7. Betonske cijevi za odvodnju

Koriste se za odvodnju površinskih voda u urbanim područjima. Izdržljive su, otporne na habanje i mogu podnijeti teška opterećenja.

8. Spomenici i skulpture

Cement se koristi za izradu spomenika, skulptura i drugih umjetničkih radova. Beton omogućuje oblikovanje različitih oblika i tekstura, čime se umjetnicima pružakreativna sloboda.

Ovi proizvodi od cementa samo su neki od mnogih dostupnih na tržištu. Upotreba cementa kao materijala pruža fleksibilnost u oblikovanju i izgradnji različitih građevinskih i dekorativnih elemenata.

## **7. ODREĐIVANJE ČVRSTOĆE CEMENTNOG MORTA (HRN EN 196-1; 2005)**

### **7.1. Priprema svježeg cementnog morta**

U laboratoriju Građevinskog fakulteta u Rijeci, izvršio sam ispitivanje uzoraka očvrstnalog cementnog morta kako bih odredio čvrstoću cementa. Ispitani su uzorci izrađeni s 3 različite vrste agregata, i to klasičan agregat proizvođača Holcim, reciklirani asfalt i reciklirani agregat, Slika 15,16 i 17. Ispitivanje je izvršeno prema normi HRN EN 196-1.



*Slika 15. Agregat Holcim*



*Slika 16. Reciklirani agregat*



*Slika 17. Agregat reciklirani asfalt*

Cementni mort spravljaao sam u omjeru 1 : 3 : 0,5 (cement 450g : agregat 1350g: voda 225(g)ml). Za miješanje morta koristio sam laboratorijsku mješalicu s posudom volumena 5 litara i pripadajućom lopaticom za miješanje, Slika 18. Mješalica ima dvije brzine okretaja, 125 i 280 okretaja u minuti. Miješanje se prema normi HRN EN 196-1:2005 vrši tako da se u posudu stave cement i voda koji se miješaju 30 sekundi na prvoj brzini okretaja, zatim se dodaje agregat te ponovno miješa 30 sekundi na prvoj brzini okretaja, zatim još 30 sekundi na drugoj brzini okretaja.



*Slika 18. Laboratorijska miješalica*

## **7.2. Priprema uzorka prizme za ispitivanje**

Izmiješani svježi cementni mort se ugrađuje u metalne kalupe za formiranje uzoraka standardnih dimenzija, prizmi dimenzija 4 cm x 4 cm x 16 cm. Prije ugrađivanja morta potrebno je kistom premazati kalup uljem kako bi što lakše odvojili prizme nakon očvršćavanja. Nakon ugradnje cementnog morta u kalup, isti se postavi na vibro-ploču kako bi se uklonio višak zraka (zračni mjehurići) i osigurala homogenost mješavine, eventualno se dopuni po potrebi i pokrlopa nauljenim staklom do očvršćavanja, Slika 19.



*Slika 19. Cementni mort u kalupima*

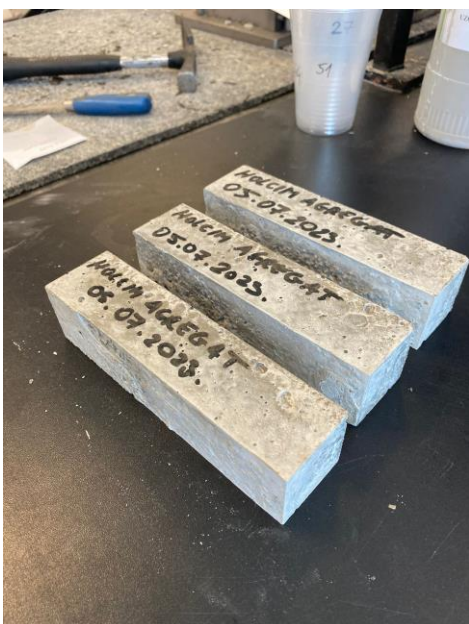
Nakon očvršćavanja cementnog morta u kalupu, uz pomoć laganih udaraca čekićem, Slika 20, vade se uzorci, od svakog agregata po tri prizme, koje ovisno o agregatu označavam te zapisujem datum izrade uzorka, Slika 21, 22 i 23.



Slika 20. Odvajanje kalupa od cementnih prizmi



Slika 22. Prizme s recikliranim agregatom

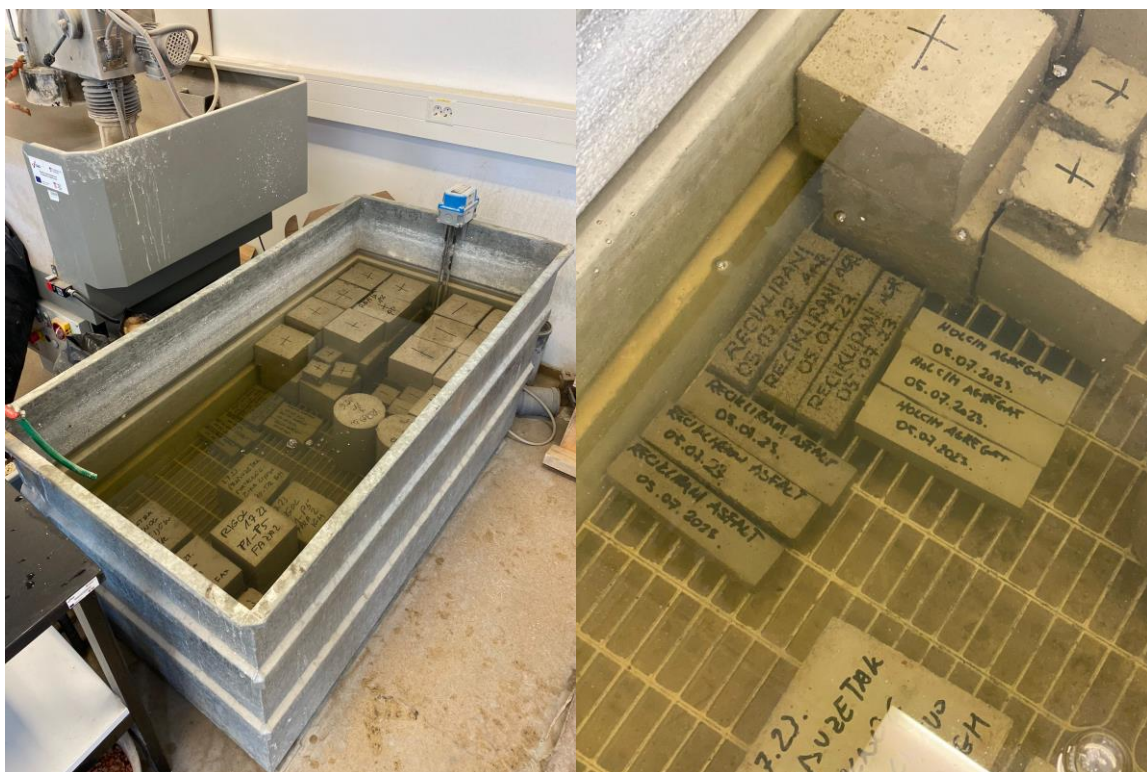


Slika 21. Prizme s Holcim agregatom



Slika 23. Prizme s agregatom od recikliranog asfalta

Njegovanje svih 9 uzoraka vršim na isti način, u vodenom bazenu, Slika 24, kako bi se spriječilo brzo isušivanje. Ovo je dio procesa vlaženja i zrenja uzoraka koji je važan za razvoj čvrstoće cementa. Održavanje odgovarajuće vlažnosti pomaže u sprječavanju isušivanja i osigurava da se uzorci pravilno razvijaju tijekom razdoblja zrenja. Važno je održavati konstantne uvjete, uključujući temperaturu i vlažnost, kako bi rezultati ispitivanja bili pouzdani i usporedivi. Ispitivanje čvrstoće cementa provest ću nakon 56 dana od miješanja, a standardno se ispitivanja vrše nakon 2, 7 ili 28 dana.



*Slika 24. Vodeni bazen za sazrijevanje cementnih prizmi*

Rezultati ispitivanja čvrstoće mogu se promijeniti s vremenom, a dulje vrijeme zrenja može dovesti do daljnjeg povećanja čvrstoće cementa.

Tablica 3. Uzorci cementnih prizmi po oznakama

	UZORAK	JEDINSTVENA OZNAKA UZORKA	DIMENZIJE [mm]			MASA [kg]
			b	h	l	
KLASIČNI AGREGAT	Holcim agregat 1	A1	41,0	40,2	160,4	0,57
	Holcim agregat 2	A2	41,0	40,1	160,4	0,57
	Holcim agregat 3	A3	42,0	40,3	160,3	0,59
REKILIRANI ASFALT	Reciklirani asfalt 1	RAF1	41,0	40,5	160,5	0,55
	Reciklirani asfalt 2	RAF2	41,8	40,2	160,2	0,54
	Reciklirani asfalt 3	RAF3	42,1	40,3	160,4	0,56
REKILIRANI AGREGAT	Reciklirani agregat 1	RAG1	40,3	40,0	160,1	0,43
	Reciklirani agregat 2	RAG2	39,9	40,5	159,6	0,43
	Reciklirani agregat 3	RAG3	39,7	40,4	158,8	0,43

### 7.3. Ispitivanje čvrstoće na vlak (savijanje)

Ispitivanje čvrstoće na vlak vrši se pomoću savijanja u tri točke, Slika 25. Prije postave prizme u uređaj za ispitivanje, svaku prizmu je potrebno izmjeriti (b, h, l) u milimetrima te izvagati u gramima, Tablica 3. U program se unose dobiveni izmjeri, starost uzorka, norma po kojoj se izvodi ispitivanje i dr. Uzorak se postavi u uređaj tako da se jednako osloni na dva donja oslonca koji su međusobno udaljeni 100 mm, a da je sredina uzorka ispod točke nanošenja opterećenja. Opterećenje se nanosi jednoliko u vremenu ( $50 \pm 10$  N/s) do sloma. U trenutku sloma prizme bilježi se maksimalna sila koja je djelovala u tom trenutku. Rezultati ispitivanja čvrstoće zabilježeni su u izvješću, uključujući maksimalnu silu koju je uzorak podnio pri tlaku i druge relevantne podatke. Ispitivanje se vrši istim postupkom na tri uzorka Ova metoda osigurava standardiziran način za procjenu čvrstoće cementa i važna je uloga u građevinskoj industriji kako bi se osigurala sigurnost i pouzdanost građevinskih konstrukcija. Važno je pridržavati se normi HRN EN 196-1 kako bi se osigurala dosljednost i točnost rezultata ispitivanja.





Slika 25. Ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem

Čvrstoća na savijanje računa se kao srednja vrijednost tri ispitana uzorka prizme formulom:

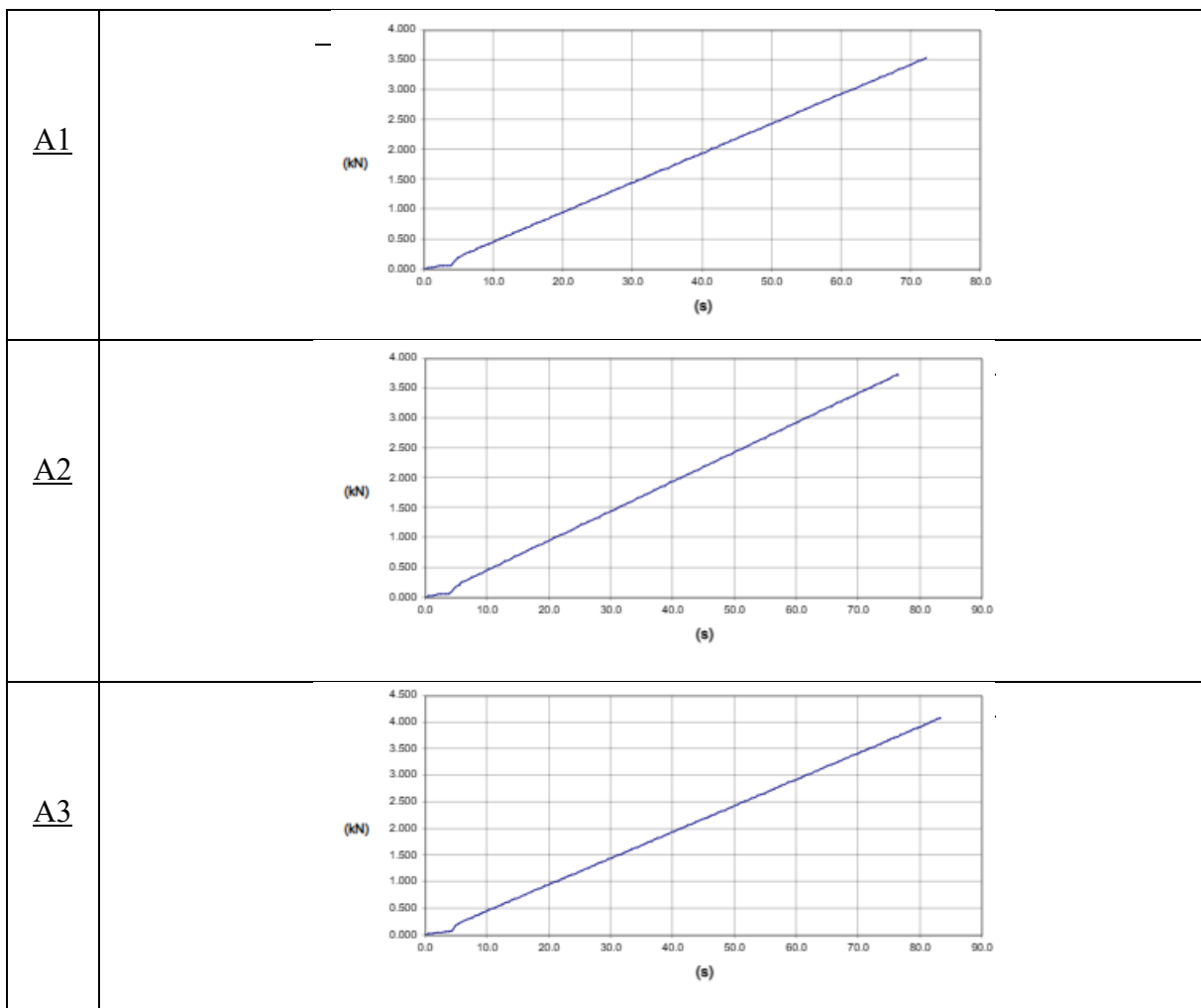
$$\sigma_f = \frac{1,5 * F_f * l}{b * h^2}$$

$\sigma_f$  – čvrstoća na savijanje [Mpa];  $F_f$  – sila sloma [N];  $b$  – širina poprečnog presjeka [mm];  $h$  – visina poprečnog presjeka [mm];  $l$  – udaljenost između oslonaca [mm]

Ispitivanje se vršilo na ukupno 9 uzorka prizme, od kojih su svaka 3 spravljana sa drugačijim agregatom. 3 uzorka sa klasičnim agregatom, 3 sa recikliranim asfaltom i 3 sa recikliranim agregatom.

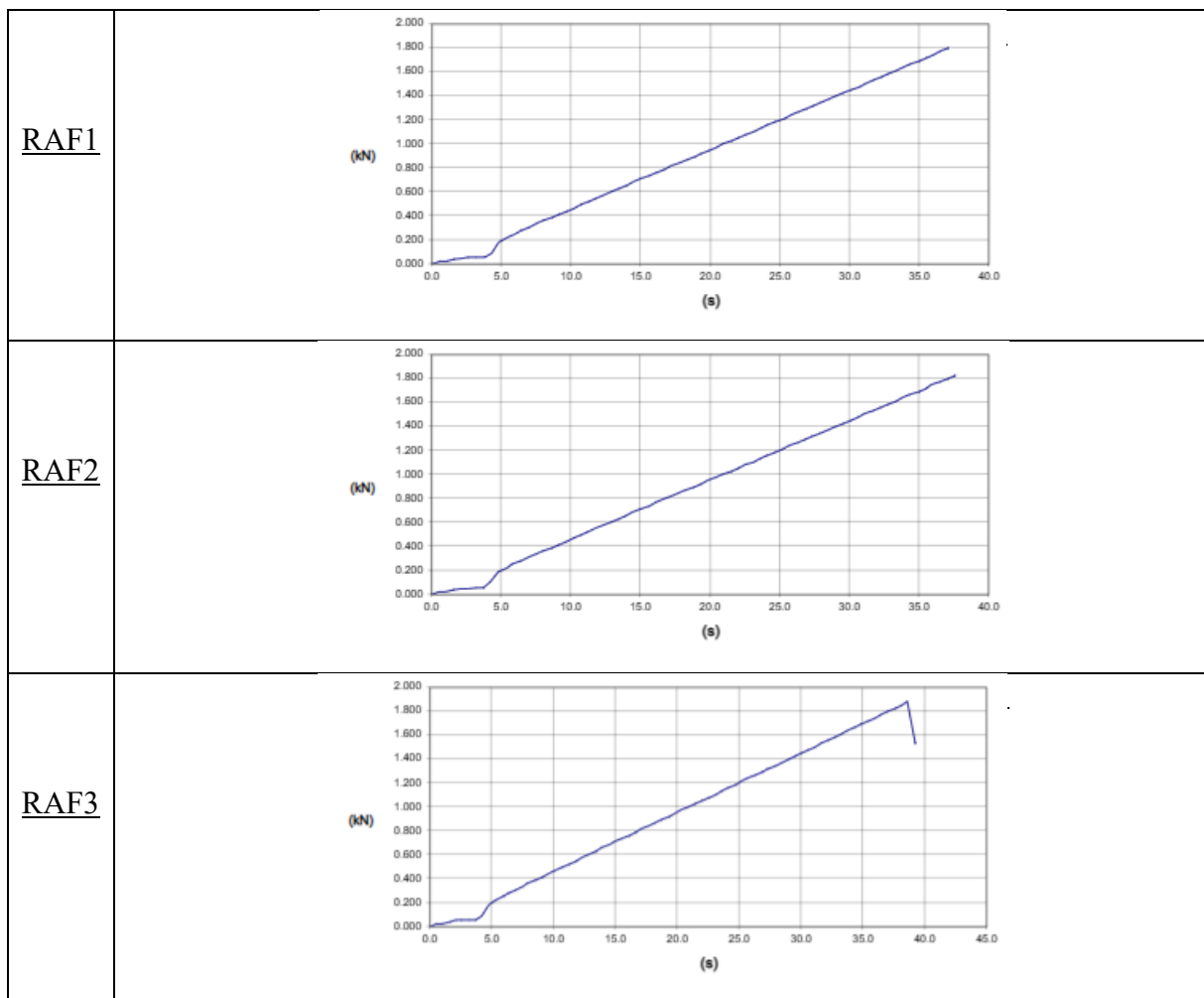
### 7.3.1. Rezultati ispitivanja čvrstoće na vlak 30.08.2023. HRN EN 196-1:

#### Rezultati ispitivanja za klasični agregat (Holcim)



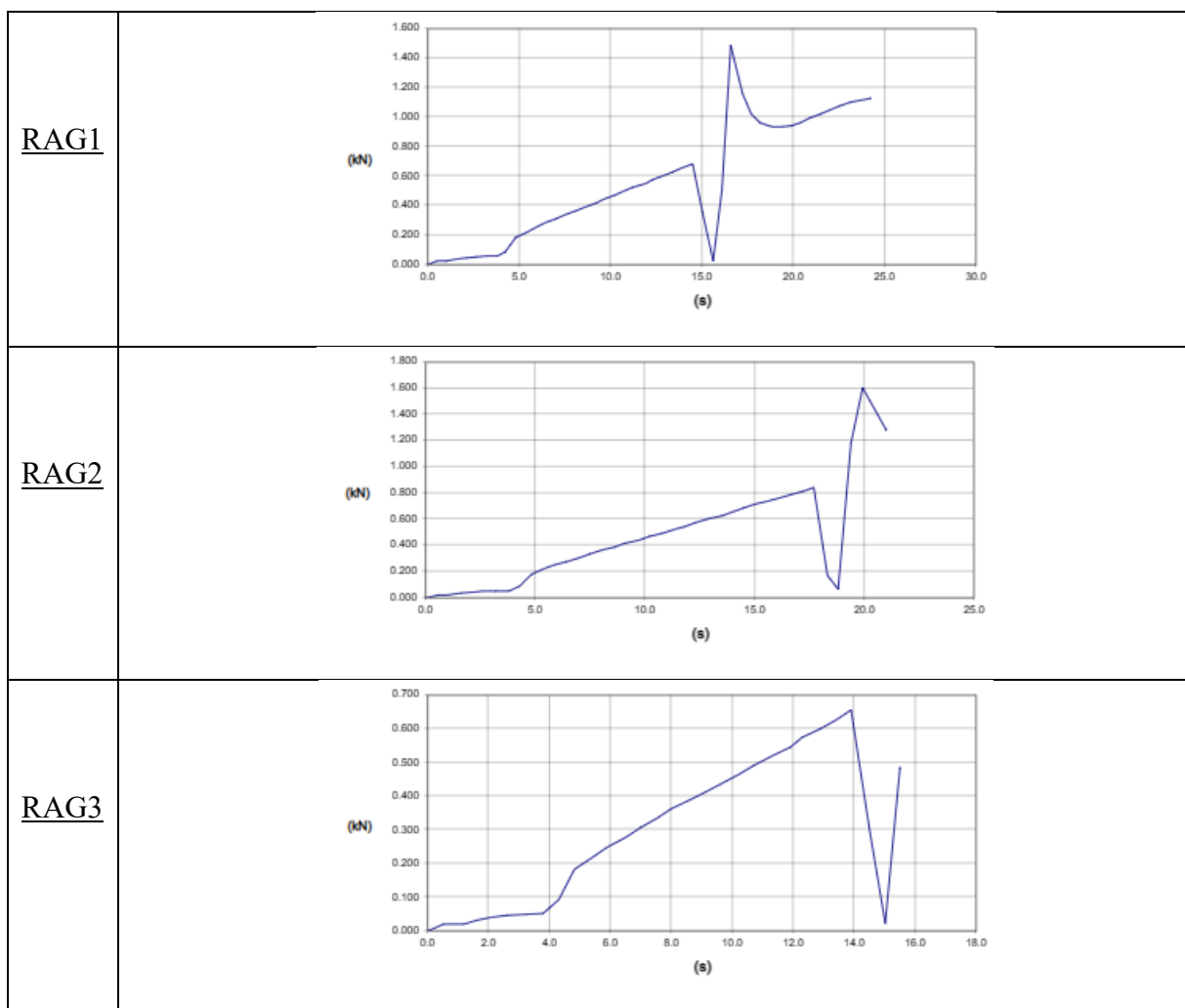
Slika 26. Grafički prikaz nanošenja vlačnog opterećenja na uzorak s klasičnim agregatom u vremenu, do sile sloma

## Rezultati ispitivanja za reciklirani asfalt



Slika 27. Grafički prikaz nanošenja vlačnog opterećenja na uzorak s recikliranim asfaltom u vremenu, do sile sloma

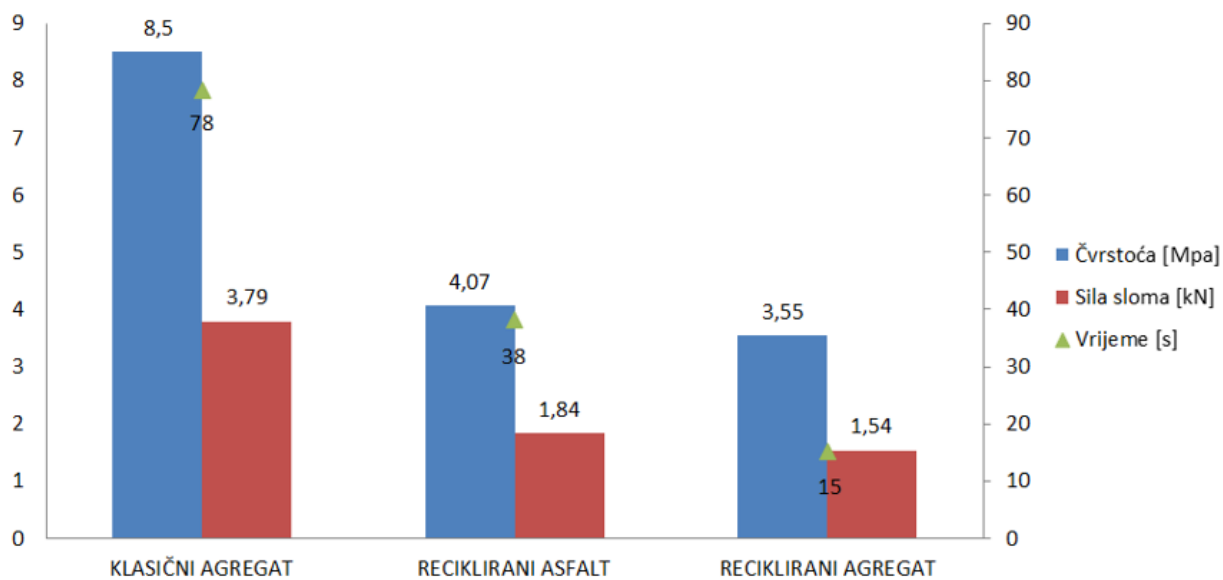
## Rezultati ispitivanja za reciklirani agregat



Slika 28. Grafički prikaz nanošenja vlačnog opterećenja na uzorak s recikliranim agregatom u vremenu, do sile sloma

Tablica 4. Vlačna čvrstoća cementa savijanjem

	OZNAKA	SILA SLOMA [N]	ČVRSTOĆA [MPa]	SREDNJA ČVRSTOĆA [MPa]
KLASIČNI AGREGAT	A1	3528	<b>7,99</b>	<b>8,50</b>
	A2	3743	<b>8,53</b>	
	A3	4099	<b>8,99</b>	
RECIKLIRANI ASFALT	RAF1	1799	<b>4,02</b>	<b>4,07</b>
	RAF2	1822	<b>4,03</b>	
	RAF3	1897	<b>4,15</b>	
RECIKLIRANI AGREGAT	RAG1	1484	<b>3,45</b>	<b>3,55</b>
	RAG2	1813	<b>4,15</b>	
	RAG3	1324	<b>3,06</b>	



Slika 29. Grafički prikaz usporedbe uzoraka po prosječnoj čvrstoći, sili sloma i vremenu do trenutka sloma, ispitivanje na vlak

### **7.3.2. Analiza rezultata ispitivanja na vlak**

Usporedbom srednjih čvrstoća uzorka prizme, zaključujem da izbor agregata ima veliku ulogu u čvrstoći materijala. Isto tako uzorci prizme razlikuju se po intenzitetu sile sloma i vremenskom periodu od trenutka nanošenja sile do sloma što je vidljivo i u grafičkim prikazima na Slikama 26, 27 i 28. Svi uzorci su podjednake dimenzije, ali mogu primijetiti razliku u težini istih ovisno o korištenom agregatu.

Uzorak s klasičnim agregatom ima najveću silu sloma [N], čvrstoću [Mpa] te je bilo potrebno najviše vremena [s] da dođe do sloma uzorka prizme. Može se reći da su ovi uzorci puno dulje izdržali opterećenje prije nego su se slomili, nego ostali. Iako podjednake težine kao i uzorci prizme s agregatom recikliranim asfaltom. Uzorci s klasičnim agregatom imaju čak dvostruko veću čvrstoću. Uzorci s recikliranim agregatom su najmanje težine ali i najslabijih karakteristika što je vidljivo u Tablici 4 i Slikama 26, 27, 28 i 29.

### **7.4. Ispitivanje čvrstoće na tlak**

Nakon ispitivanja na savijanje, slomom prizme dobiva se dva dijela uglavnom nepravilnog oblika. Ispitivanje čvrstoće na tlak se provodi na polovicama uzoraka slomljenih savijanjem prema normi HRN EN 196-1. Uzorci se podvrgavaju tlačnom testu koristeći uređaj prikazan na Slici 30. Potrebno je u program unijeti podatke kao i kod ispitivanja čvrstoće na tlak, ali ovog puta se ne unose dimenzije izmjerene prizme nego dimenzije metalnih pločica preko kojih se prenosi opterećenje na uzorke za ispitivanje i u tom slučaju je  $b$  i  $h$  40 mm. Svaki dio se opterećuje na tlak na način da se opterećenje prenosi jednoliko i s donje i s gornje strane, a nanosi se brzinom  $2400 \pm 200$  N/s, preko pravokutnih čeličnih pločica 40 x 40 mm, do sloma, Slika 31. Na taj način simuliraju se uzorci u obliku kocke  $a = 40$  mm, jer preostali dio prizme izvan pločice nema utjecaja, nije stlačen. Sila koja se primjenjuje na uzorak postupno se povećava sve dok uzorak ne pukne te se bilježi maksimalna sila.



Slika 30. Ispitivanje tlačne čvrstoće



Slika 31. Oblik sloma uzorka, nakon spitivanja na tlak

Čvrstoća na tlak računa se kao srednja vrijednost 6 ispitanih uzorka koji su polovice prizme, koristeći formulom:

$$\sigma_c = \frac{F_c}{A}$$

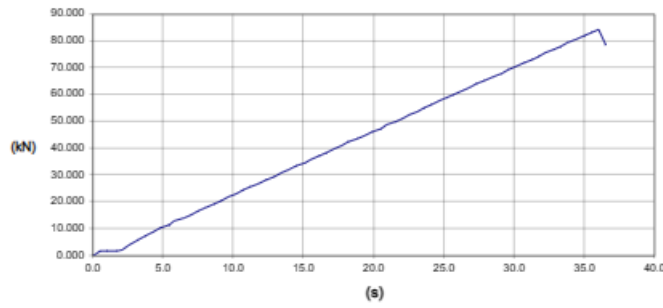
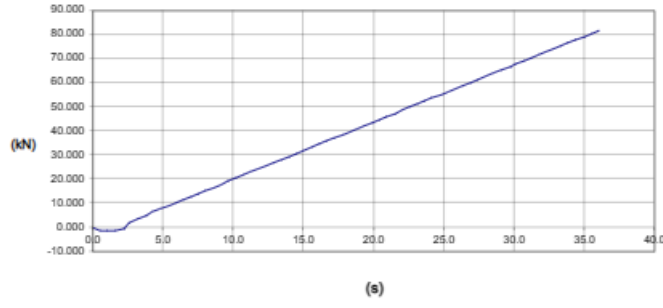
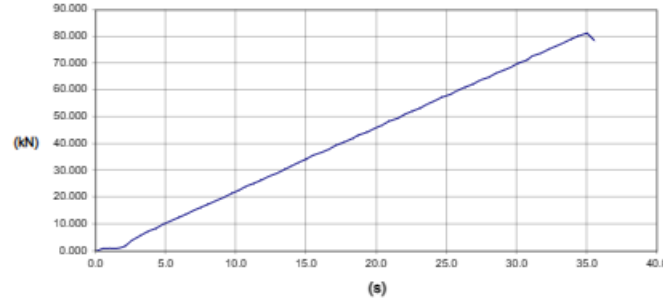
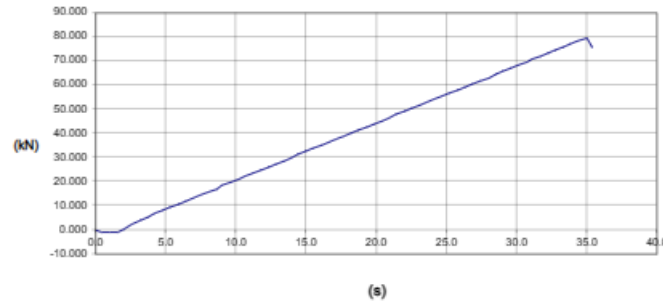
Gdje je  $A = 40 \times 40 = 1600 \text{ mm}^2$

$\sigma_c$  – čvrstoća na tlak [MPa];  $F_c$  – sila sloma [N];  $A$  – površina opterećenja [ $\text{mm}^2$ ]

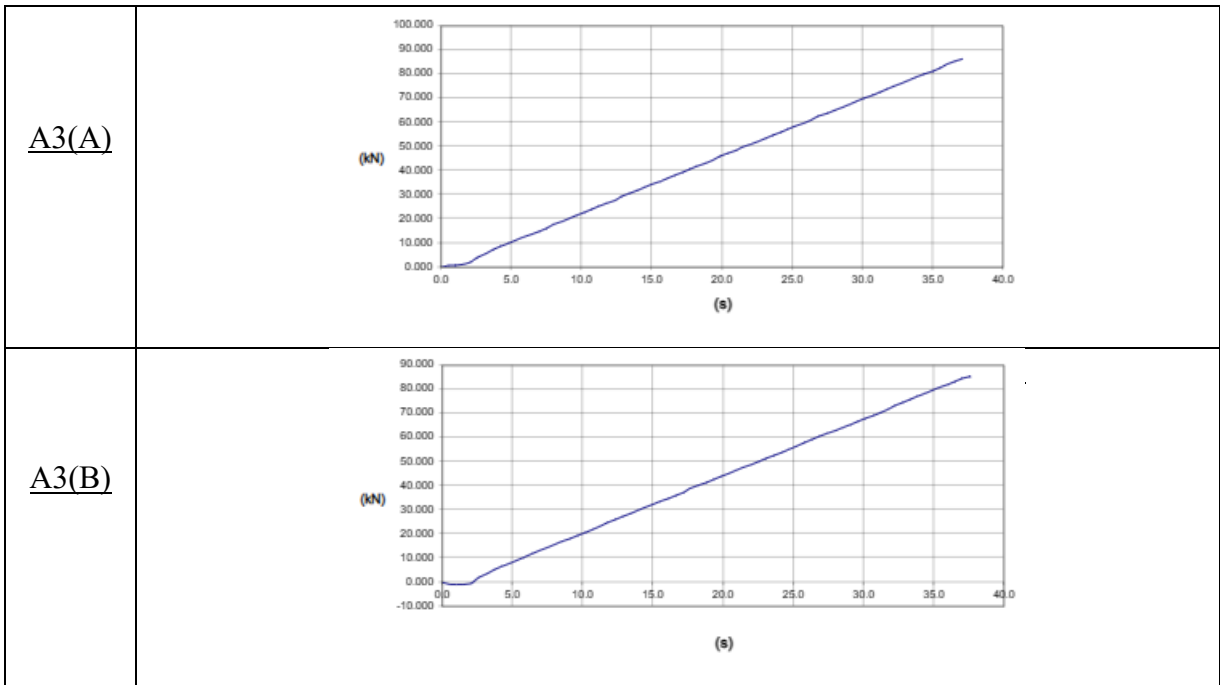
Ispitivanje se provodi na 6 uzoraka polovica prizmi, odnosno 18 uzoraka u slučaju kada su 3 različite vrste agregata. Ako jedan rezultat od 6 uzoraka istog agregata odstupa za više od 10% od srednje vrijednosti, taj se rezultat odbacuje i računa se srednja vrijednost ostalih 5 rezultata. Ako još jedan, od preostalih 5 rezultata odstupa za više od 10% od srednje vrijednosti, odbacuju se svi rezultati tog ispitivanja.

### 7.4.1. Rezultati ispitivanja čvrstoće na tlak 30.08.2023. HRN EN 196-1:

#### Rezultati ispitivanja za klasični agregat (Holcim)

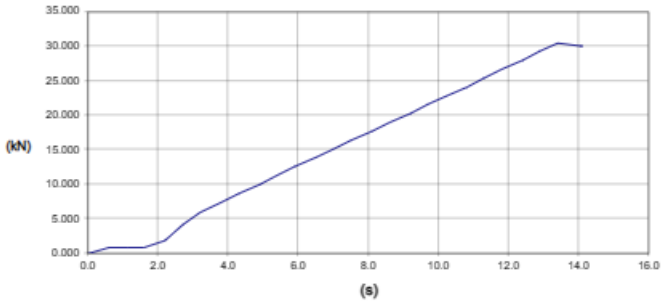
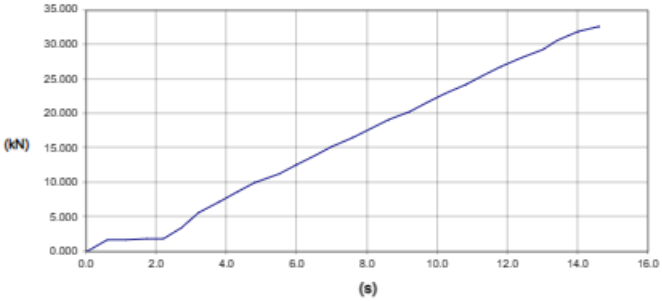
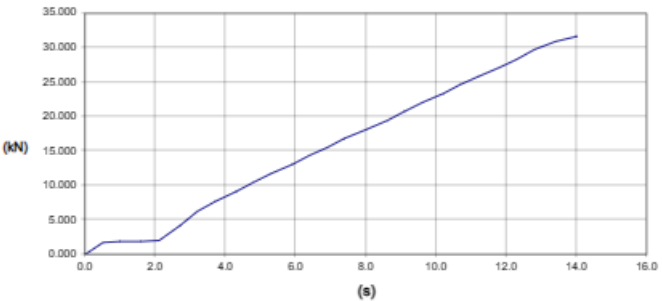
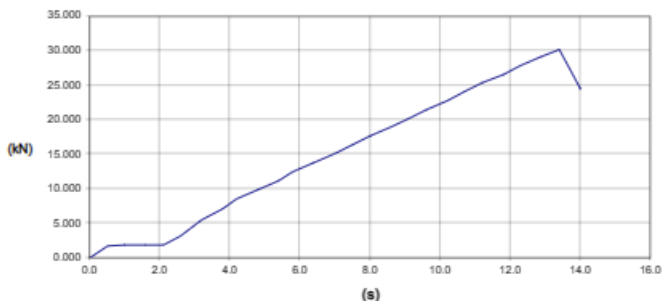
<u>A1(A)</u>	 <p>Graph showing Force (kN) vs. Time (s) for specimen A1(A). The force increases linearly from 0 kN at 0s to approximately 82,000 kN at 36s.</p>
<u>A1(B)</u>	 <p>Graph showing Force (kN) vs. Time (s) for specimen A1(B). The force increases linearly from 0 kN at 0s to approximately 80,000 kN at 36s.</p>
<u>A2(A)</u>	 <p>Graph showing Force (kN) vs. Time (s) for specimen A2(A). The force increases linearly from 0 kN at 0s to approximately 80,000 kN at 36s.</p>
<u>A2(B)</u>	 <p>Graph showing Force (kN) vs. Time (s) for specimen A2(B). The force increases linearly from 0 kN at 0s to approximately 78,000 kN at 36s.</p>

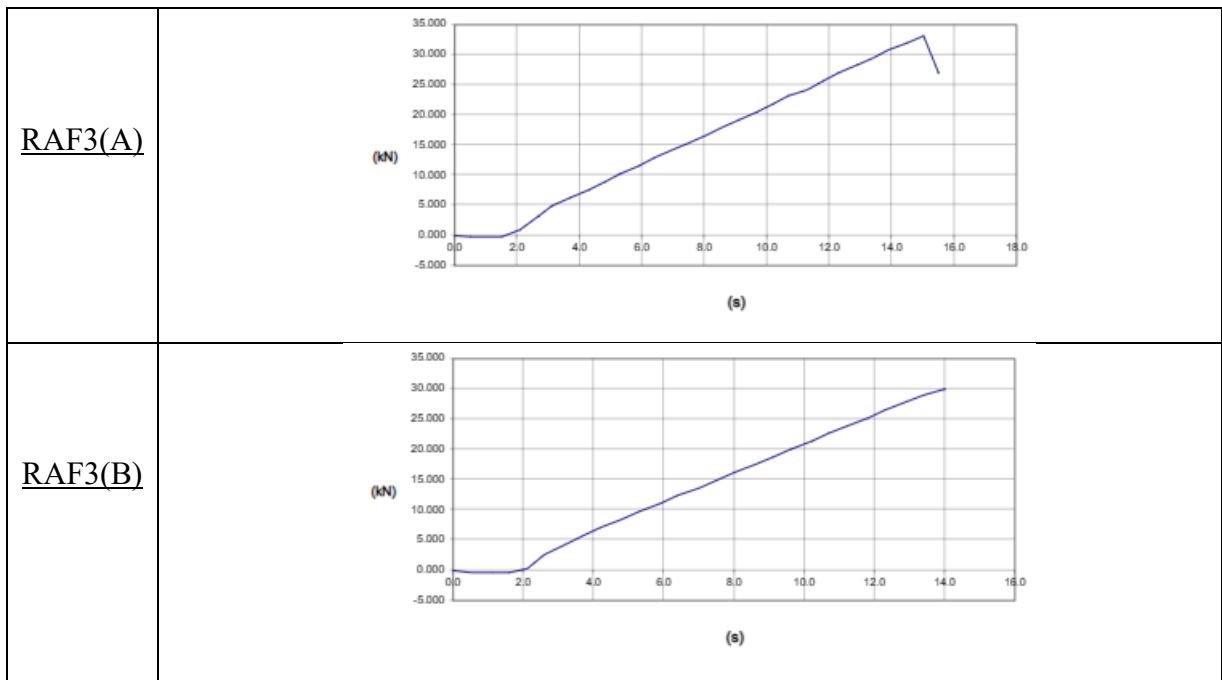




*Slika 32. Grafički prikaz nanošenja tlačnog opterećenja na uzorak s klasičnim agregatom u vremenu, do sile sloma*

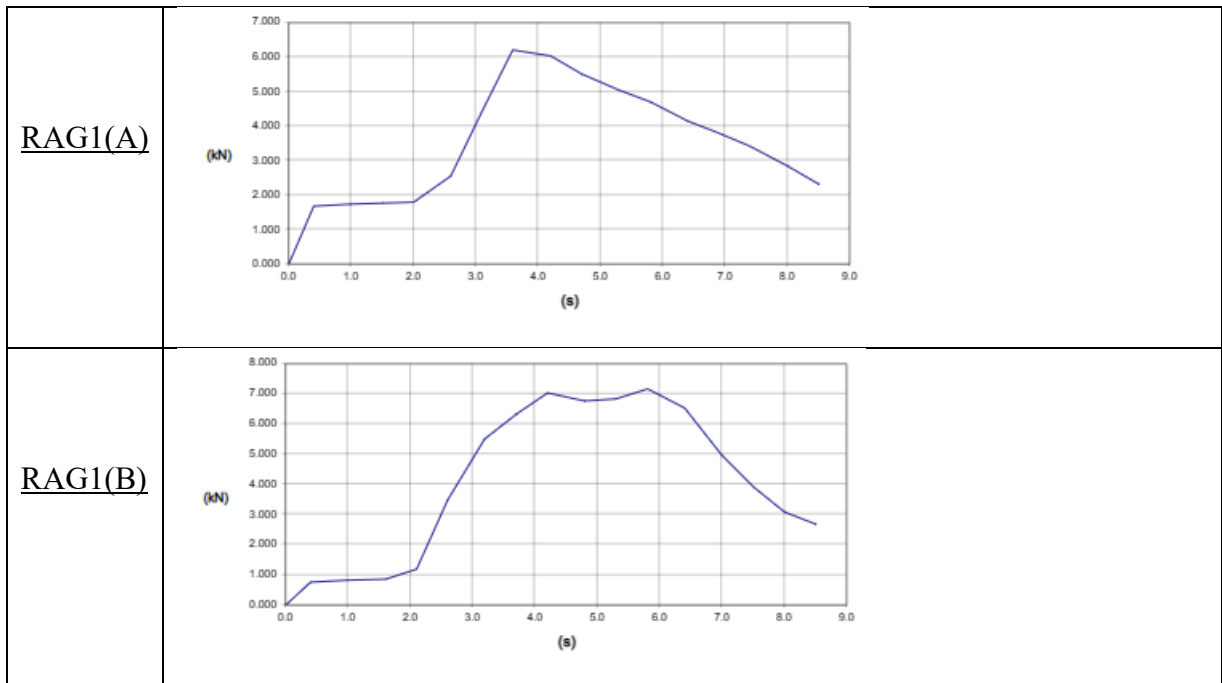
## Rezultati ispitivanja za reciklirani asfalt

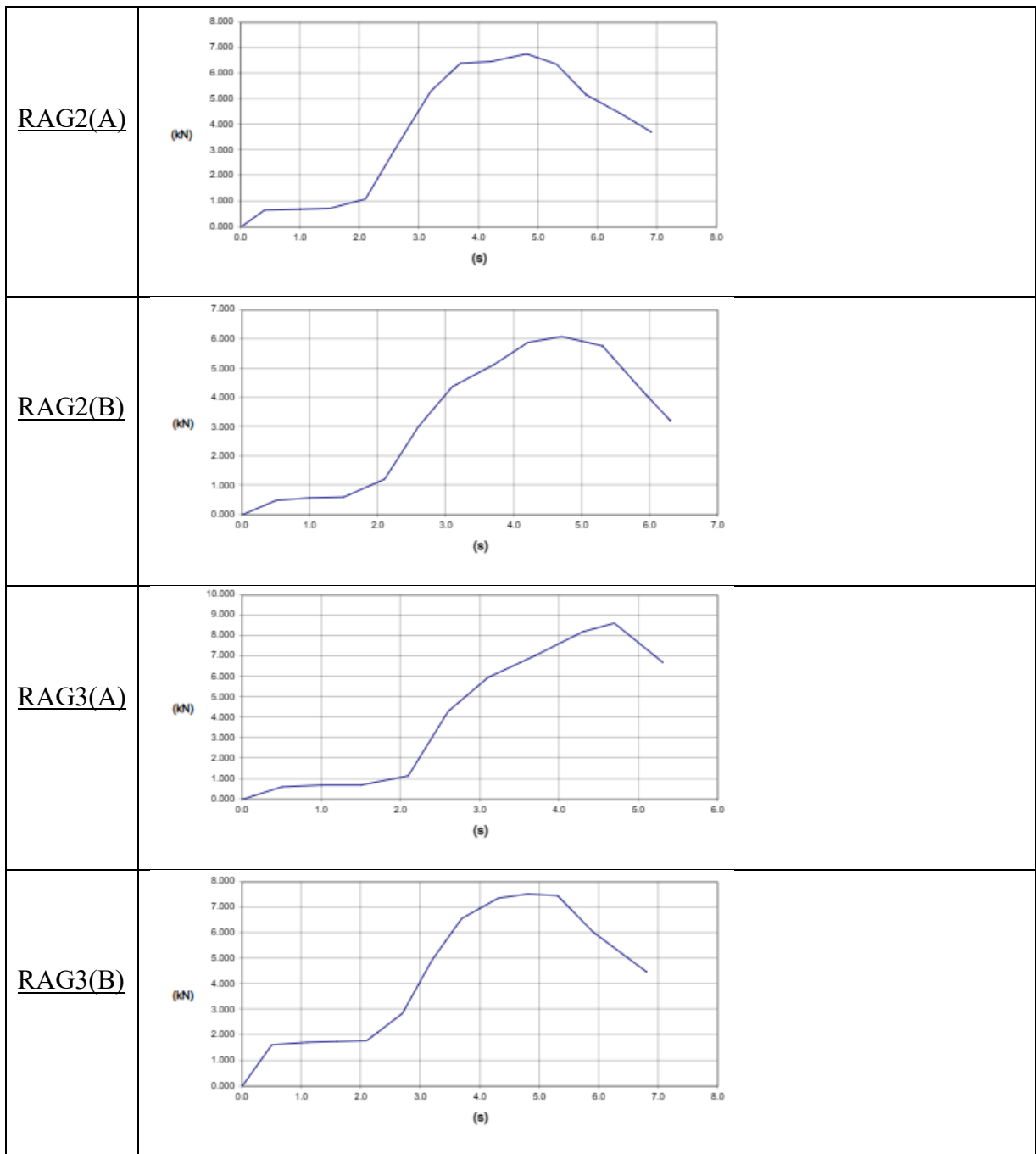
<u>RAF1(A)</u>	 <p>The graph for RAF1(A) shows a force-time curve starting at (0,0). It remains near zero until about 2 seconds, then rises to approximately 5,000 kN at 4 seconds. From 4 to 14 seconds, the force increases steadily to a peak of about 30,000 kN at 14 seconds, where it slightly levels off.</p> <table border="1"><thead><tr><th>Time (s)</th><th>Force (kN)</th></tr></thead><tbody><tr><td>0.0</td><td>0.000</td></tr><tr><td>2.0</td><td>1.000</td></tr><tr><td>4.0</td><td>5.000</td></tr><tr><td>6.0</td><td>10.000</td></tr><tr><td>8.0</td><td>15.000</td></tr><tr><td>10.0</td><td>20.000</td></tr><tr><td>12.0</td><td>25.000</td></tr><tr><td>14.0</td><td>30.000</td></tr></tbody></table>	Time (s)	Force (kN)	0.0	0.000	2.0	1.000	4.0	5.000	6.0	10.000	8.0	15.000	10.0	20.000	12.0	25.000	14.0	30.000		
Time (s)	Force (kN)																				
0.0	0.000																				
2.0	1.000																				
4.0	5.000																				
6.0	10.000																				
8.0	15.000																				
10.0	20.000																				
12.0	25.000																				
14.0	30.000																				
<u>RAF1(B)</u>	 <p>The graph for RAF1(B) shows a force-time curve starting at (0,0). It remains near zero until about 2 seconds, then rises to approximately 5,000 kN at 4 seconds. From 4 to 14 seconds, the force increases steadily to a peak of about 32,000 kN at 14 seconds.</p> <table border="1"><thead><tr><th>Time (s)</th><th>Force (kN)</th></tr></thead><tbody><tr><td>0.0</td><td>0.000</td></tr><tr><td>2.0</td><td>1.000</td></tr><tr><td>4.0</td><td>5.000</td></tr><tr><td>6.0</td><td>10.000</td></tr><tr><td>8.0</td><td>15.000</td></tr><tr><td>10.0</td><td>20.000</td></tr><tr><td>12.0</td><td>25.000</td></tr><tr><td>14.0</td><td>32.000</td></tr></tbody></table>	Time (s)	Force (kN)	0.0	0.000	2.0	1.000	4.0	5.000	6.0	10.000	8.0	15.000	10.0	20.000	12.0	25.000	14.0	32.000		
Time (s)	Force (kN)																				
0.0	0.000																				
2.0	1.000																				
4.0	5.000																				
6.0	10.000																				
8.0	15.000																				
10.0	20.000																				
12.0	25.000																				
14.0	32.000																				
<u>RAF2(A)</u>	 <p>The graph for RAF2(A) shows a force-time curve starting at (0,0). It remains near zero until about 2 seconds, then rises to approximately 5,000 kN at 4 seconds. From 4 to 14 seconds, the force increases steadily to a peak of about 31,000 kN at 14 seconds.</p> <table border="1"><thead><tr><th>Time (s)</th><th>Force (kN)</th></tr></thead><tbody><tr><td>0.0</td><td>0.000</td></tr><tr><td>2.0</td><td>1.000</td></tr><tr><td>4.0</td><td>5.000</td></tr><tr><td>6.0</td><td>10.000</td></tr><tr><td>8.0</td><td>15.000</td></tr><tr><td>10.0</td><td>20.000</td></tr><tr><td>12.0</td><td>25.000</td></tr><tr><td>14.0</td><td>31.000</td></tr></tbody></table>	Time (s)	Force (kN)	0.0	0.000	2.0	1.000	4.0	5.000	6.0	10.000	8.0	15.000	10.0	20.000	12.0	25.000	14.0	31.000		
Time (s)	Force (kN)																				
0.0	0.000																				
2.0	1.000																				
4.0	5.000																				
6.0	10.000																				
8.0	15.000																				
10.0	20.000																				
12.0	25.000																				
14.0	31.000																				
<u>RAF2(B)</u>	 <p>The graph for RAF2(B) shows a force-time curve starting at (0,0). It remains near zero until about 2 seconds, then rises to approximately 5,000 kN at 4 seconds. From 4 to 14 seconds, the force increases steadily to a peak of about 30,000 kN at 14 seconds, after which it drops sharply to approximately 24,000 kN.</p> <table border="1"><thead><tr><th>Time (s)</th><th>Force (kN)</th></tr></thead><tbody><tr><td>0.0</td><td>0.000</td></tr><tr><td>2.0</td><td>1.000</td></tr><tr><td>4.0</td><td>5.000</td></tr><tr><td>6.0</td><td>10.000</td></tr><tr><td>8.0</td><td>15.000</td></tr><tr><td>10.0</td><td>20.000</td></tr><tr><td>12.0</td><td>25.000</td></tr><tr><td>14.0</td><td>30.000</td></tr><tr><td>14.5</td><td>24.000</td></tr></tbody></table>	Time (s)	Force (kN)	0.0	0.000	2.0	1.000	4.0	5.000	6.0	10.000	8.0	15.000	10.0	20.000	12.0	25.000	14.0	30.000	14.5	24.000
Time (s)	Force (kN)																				
0.0	0.000																				
2.0	1.000																				
4.0	5.000																				
6.0	10.000																				
8.0	15.000																				
10.0	20.000																				
12.0	25.000																				
14.0	30.000																				
14.5	24.000																				



*Slika 33. Grafički prikaz nanošenja tlačnog opterećenja na uzorak s agregatom reciklirani asfalt u vremenu, do sile sloma*

Rezultati ispitivanja za reciklirani agregat

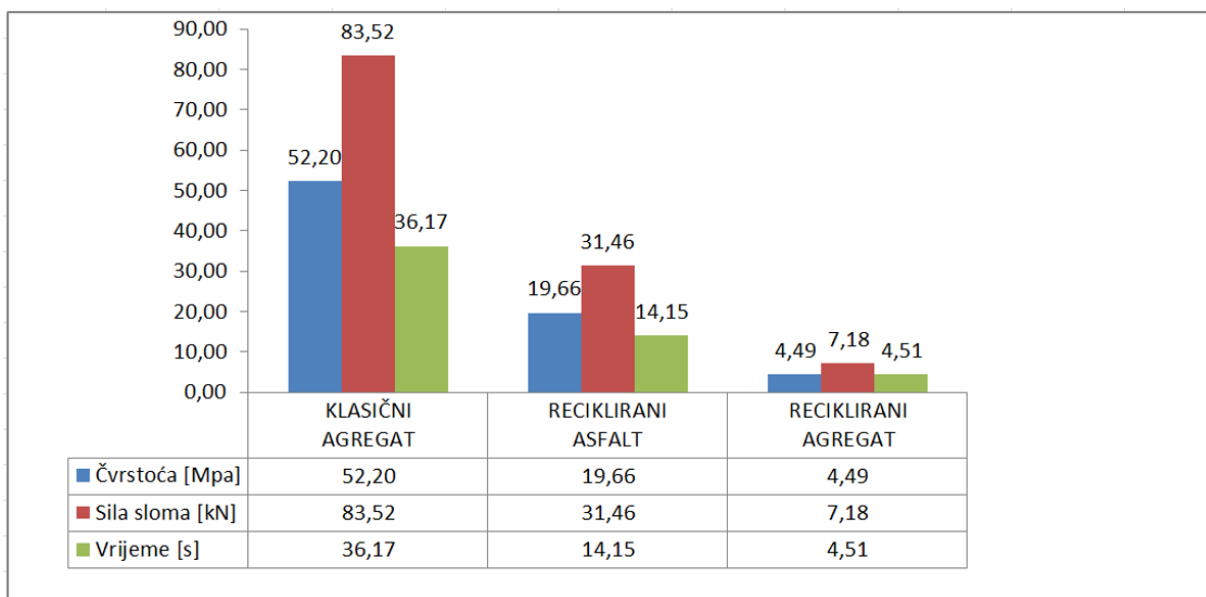




Slika 34. Grafički prikaz nanošenja tlačnog opterećenja na uzorak s agregatom reciklirani asfalt u vremenu, do sile sloma

Tablica 5. Tlačna čvrstoća cementa

	OZNAKA	SILA SLOMA [N]	ČVRSTOĆA [MPa]	SREDNJA ČVRSTOĆA [MPa]
KLASIČAN AGREGAT	A1(A)	85000	<b>53.13</b>	<b>52.20</b>
	A1(B)	82030	<b>51.27</b>	
	A2(A)	81950	<b>51.22</b>	
	A2(B)	80210	<b>50.13</b>	
	A3(A)	86390	<b>53.99</b>	
	A4(B)	85550	<b>53.47</b>	
RECIKLIRANI ASFALT	RAF1(A)	31000	<b>19.37</b>	<b>19.66</b>
	RAF1(B)	32640	<b>20.40</b>	
	RAF2(A)	31720	<b>19.83</b>	
	RAF2(B)	30220	<b>18.88</b>	
	RAF3(A)	33190	<b>20.74</b>	
	RAF3(B)	29970	<b>18.73</b>	
RECIKLIRANI AGREGAT	RAG1(A)	6590	<b>4.12</b>	<b>4.49</b>
	RAG1(B)	7170	<b>4.48</b>	
	RAG2(A)	6800	<b>4.25</b>	
	RAG2(B)	6090	<b>3.81</b>	
	RAG3(A)	8810	<b>5.51</b>	
	RAG3(B)	7610	<b>4.75</b>	



Slika 35. Grafički prikaz usporedbe uzoraka po prosječnoj čvrstoći, sili sloma i vremenu do trenutka sloma, ispitivanje na tlak

### Računski postupak:

Klasični agregat

$$\frac{|52,20 - 50,13|}{52,20} \times 100\% = 3,96\% < 10\% - \text{prihvaća se!}$$

$$\frac{|52,20 - 53,99|}{52,20} \times 100\% = 3,42\% < 10\% - \text{prihvaća se!}$$

Reciklirani asfalt

$$\frac{|19,66 - 18,73|}{19,66} \times 100\% = 4,73\% < 10\% - \text{prihvaća se!}$$

$$\frac{|19,66 - 20,74|}{19,66} \times 100\% = 5,49\% < 10\% - \text{prihvaća se!}$$

Reciklirani agregat

$$\frac{|4,49 - 3,81|}{4,49} \times 100\% = 15,14\% > 10\% - \text{odbacuje se!}$$

$$\frac{|4,49 - 4,12|}{4,49} \times 100\% = 8,24\% < 10\% - \text{prihvaća se!}$$

$$\frac{|4,49 - 5,51|}{4,49} \times 100\% = 22,72\% > 10\% - \text{odbacuje se!}$$

$$\frac{|4,49 - 4,75|}{4,49} \times 100\% = 5,79\% < 10\% - \text{prihvaća se!}$$

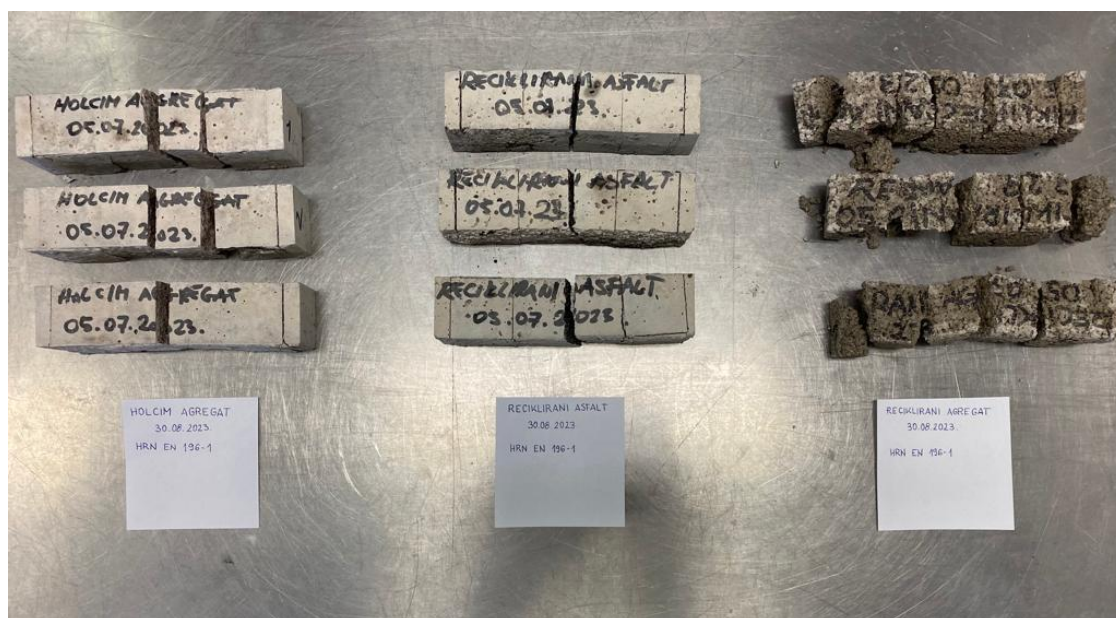
Ovo ispitivanje se odbacuje jer više rezultata odstupa od 10% srednje čvrstoće.

#### 7.4.2. Analiza rezultata ispitivanja na tlak

I u ispitivanju uzoraka na tlak, usporedbom grafičkih rezultata ispitivanja na Slikama 32, 33 i 34, ponovno mogu zaključiti da izbor agregata u cementnoj mješavini ima veliku ulogu u sili sloma [N], čvrstoći [MPa] ali i u vremenskom periodu [s] od početka tlačenja do trenutka sloma, Tablica 11. Uzorci s klasičnim agregatom imaju daleko veću silu sloma, čvrstoću kao i vremenski period od početka tlačenja do sloma u odnosu na uzorke s recikliranim asfaltom i recikliranim agregatom kao što vidimo na Slici 35. Uzorak s recikliranim asfaltom ima bolja svojstva od uzorka s recikliranim agregatom. Ispitivanje s recikliranim agregatom se odbacuje jer 2 vrijednosti odstupaju više od 10% srednje čvrstoće te je potrebno izraditi novi se uzoraka

i ponovno izvesti cijeli proces ispitivanja. Za izradu novih uzoraka s recikliranim agregatom potrebno je napraviti granulometrijsku krivulju recikliranog agregata po uzoru na klasični agregat kako bi se korigirali potrebni omjeri cementa, agregata i vode. Korišteni reciklirani agregat nije bio granuliran u potpunosti. Osim toga, reciklirani agregat je već prilikom miješanja u kratkom vremenu apsorbirao veliku količinu vode, tako da je mješavina bila suha i nije imala dobru obradljivost. Reciklirani agregat upija više vode od preostala dva agregata, te je potrebno korigirati količinu vode kada se koristi reciklirani agregat, kako bi poboljšali karakteristike svježeg i očvrstlog morta i dobili usporedive rezultate ispitivanja. Zbog nemogućnosti izrade ponovnih uzoraka prizmi u svrhu završnog rada, uzete su srednje vrijednosti i u slučaju odbačenih uzoraka.

Uzorci na kojima se izvršilo ispitivanje i dalje imaju postojani oblik prizme ali se sastoje od najmanje 4 odvojena dijela, Slika 36. Najmanju štetu uočavam na uzorku s klasičnim agregatom, koji ima i najbolje karakteristike u odnosu na preostala dva uzorka, s recikliranim asfaltom i recikliranim agregatom. Na uzorku s recikliranim agregatom uočavam najveću promjenu i štetu nastalu vršenjem ispitivanja na vlak (savijanje) i tlak, što je i očekivano s obzirom na najslabije karakteristike.



Slika 36. Uzorci cementnih prizmi nakon vlačnog i tlačnog ispitivanja

## **8. ZAKLJUČAK**

U ovom završnom radu dan je pregled razvoja proizvodnje cementa kroz povijest, trenutne tehnologije koje su prisutne u Hrvatskoj, te smjer razvoja tehnologije u budućnosti. Istražene su metode proizvodnje cementa, te izazovi s kojima se suočava u pogledu održivosti i ekološke prihvatljivosti. Opisane su osnovne vrste cementa i njihova svojstva. Na kraju je prikazano provedena izrada različitih uzoraka cementnog morta u laboratoriju, te njihovo ispitivanje u cilju određivanja čvrstoće.

Radi se o građevinskom materijalu bez kojeg bi mnoge građevinske konstrukcije bile neizvedive. Kroz povijest, cement je evoluirao od drevnih oblika do Portland cementa kojeg danas najčešće koristimo. U Hrvatskoj, proizvodnja cementa je napredovala tijekom 20. stoljeća, doprinoseći razvoju građevinske industrije i infrastrukture zemlje. Napredovala je poboljšavanjem sastava, tehnologije i upotrebe novih materijala. U proizvodnji cementa se intenzivno radi na povećanju energetske učinkovitosti, smanjenjem emisija stakleničkih plinova i primjenom održivih praksi. Ključni faktori u napretku proizvodnje cementa su smanjenje emisija CO<sub>2</sub>, korištenje alternativnih sirovina, održiva uporaba energije i poboljšanje energetske učinkovitosti. Croatia cement ima važnu ulogu u cementnoj industriji svojim djelovanjem kroz usvajanja relevantnih normativnih dokumenata u vezi s industrijom cementa te suradnjom s institucijama Republike Hrvatske.

Završni rad daje pregled najvažnijih pomaka u proizvodnji i primjeni cementa, važnost o konstantnom razvitku i učenju o novim tehnologijama proizvodnje i iskoristivosti cementa kao materijala kao rješenja za smanjenje negativnog utjecaja cementne industrije na okoliš. Održivi i ekološki cementi nude alternativne formule i proizvodne procese koji smanjuju emisije stakleničkih plinova i koriste obnovljive izvore energije. Korištenje niskougličnih cementa, uporaba alternativnih sirovina i zamjena klinkera predstavljaju inovativne pristupe koji pomažu očuvanju okoliša čemu se danas pridodaje u svijetu mnogo pažnje.

Provođenjem laboratorijskog ispitivanja na vlak i tlak na prizmama cementnog morta, standardnih dimenzija, izrađenih korištenjem tri različite vrste agregata: klasični agregat, reciklirani asfalt i reciklirani agregat, po normi HRN EN 196-1 dolazim do više zaključaka. Jako



je važno precizno i po uputama proizvođača cementa smiješati cementi mort koristeći pravilan omjer cementnog praha, agregata i vode. Pri odabiru vrste agregata, uvelike se utječe na karakteristike očvrstnalog cementa, kao što je čvrstoća, sila sloma i razlika u vremenu od početka nanošenja sile do trenutka sloma konstrukcije, u laboratorijskom slučaju, prizme. Prije izrade recepture i miješanja potrebno je dobro poznavati karakteristike svih komponenti, a ako ih nije naveo proizvođač, tada ih trebamo sami što preciznije odrediti. Jedan od zaključaka rada je i taj da korištenje recikliranih materijala kao komponente u cementnom mortu i betonu oslabljuje njihova svojstva.

## LITERATURA

- [1] D. Vrkljan, M. Klanfar Tehnologija nemetalnih mineralnih sirovina, Cement 1-36 str.
- [2] A.M. Neville and J.J. Brooks, Concrete Technology, John Wiley, New York, 1987.
- [3] F.M. Lea, The Chemistry of cement and concrete
- [4] Lafarge, proces proizvodnje, [https://www.lafarge.rs/2\\_2\\_1-Manufacturing\\_process](https://www.lafarge.rs/2_2_1-Manufacturing_process)
- [5] A. Đureković, Cement i cementni kompoziti i dodaci za beton, 1. izdanje, Školska knjiga, Zagreb 1996.
- [6] M. Burenčić, Cementne sirovine (seminarski rad), Primjena, minerologija i petrologija, Geotehički fakultet, Zagreb, 2010.
- [7] D. Bačun: “E-održivost, globalna inicijativa“, ISO Forum Croaticum
- [8] AGGREGATE INDUSTRIES, dostupno na: [ECOPact - The Green Concrete | Aggregate Industries](#) (29.05.2023)
- [9] Croatia cement, dostupno na: [http://www.croatiacement.hr/hr/CEMEX\\_ORizvjestaj2014.pdf](http://www.croatiacement.hr/hr/CEMEX_ORizvjestaj2014.pdf) (29.05.2023)
- [10] Industrija cementa u RH, Croatia Cement, dostupno na: <http://www.croatiacement.hr/hr/industrija-cementa-u-rh.php> (21.05.2023.)
- [11] Cemex, dostupno na: <https://www.cemex.hr/> (21.05.2023.)
- [12] Holcim Hrvatska, dostupno na: <https://www.holcim.hr/hr/proizvodi-i-usluge/cement/cement-rasuto/holcim-lumen-cement> (28.05.2023.)
- [13] Holcim ECOPlanet, dostupno na: [Holcim launches ECOPlanet global range of green cement](#) (29.05.2023)
- [14] Nexe, dostupno na: <https://www.nexe.hr/> (29.05.2023.)