

Cement

Cemet je mineralno vezivo, čija je pretežna primjena u građevinarstvu kao vezivo prirodnih ili umjetnih agregata za proizvodnju betona i mortova. Cement je zajednički naziv za sva veziva s izrazito hidrauličkim svojstvima, što znači da vežu i stvrdnjavaju u dodiru s vodom, svejedno da li se nalaze na zraku ili pod vodom, jer reakcijom s vodom daju stabilne ili netopljive produkte (sve vrste cementa i hidraulično vapno). Za razliku od nehidrauličnih veziva koja vežu i stvrdnjavaju djelovanjem vode na zraku, a pod vodom ne mogu očvrnuti, jer su im produkti reakcija s vodom topljivi spojevi i nestabilni u vodi (glina, vapno i gips). Riječ cement dolazi od latinskih riječi caedere = lomiti i lapidem = kamen. To je najvažnije mineralno vezivo, koje pomiješano s vodom i agregatom daje beton.

Cementi se prema svojem mineralnom sastavu dijele u dvije skupine:

- silikatni cementi,
- aluminatni cementi.

Silikatni su oni cementi kod kojih su glavni minerali klinkera silikati, a prema sastavu se mogu podijeliti u podgrupe:

- čisti Portland cement,
- Portland cement s dodacima,
- pucolanski cement,
- metalurški cement,
- miješani cement,
- bijeli cement.

Aluminatni cementi kao glavne minerale klinkera sadrže kalcijeve aluminate.

Prema namjeni cementi se dijele na cemente opće namjene među koje spada većina silikatnih cemenata i na cemente posebne namjene ili specijalne cemente gdje spadaju:

- cementi niske topline hidratacije,
- sulfatno otporni cementi,
- bijeli cement,
- aluminatni cement.

Proizvodni proces

Tipični proces proizvodnje cementa uključuje sljedeće faze:

- Eksploatacija mineralnih sirovina
- Priprema (oplemenjivanje i homogenizacija) mineralnih sirovina za proizvodnju klinkera
- Miješanje mineralnih sirovina i proizvodnja klinkera
- Mljevenje klinkera i dodavanje aditiva te pakiranje cementa

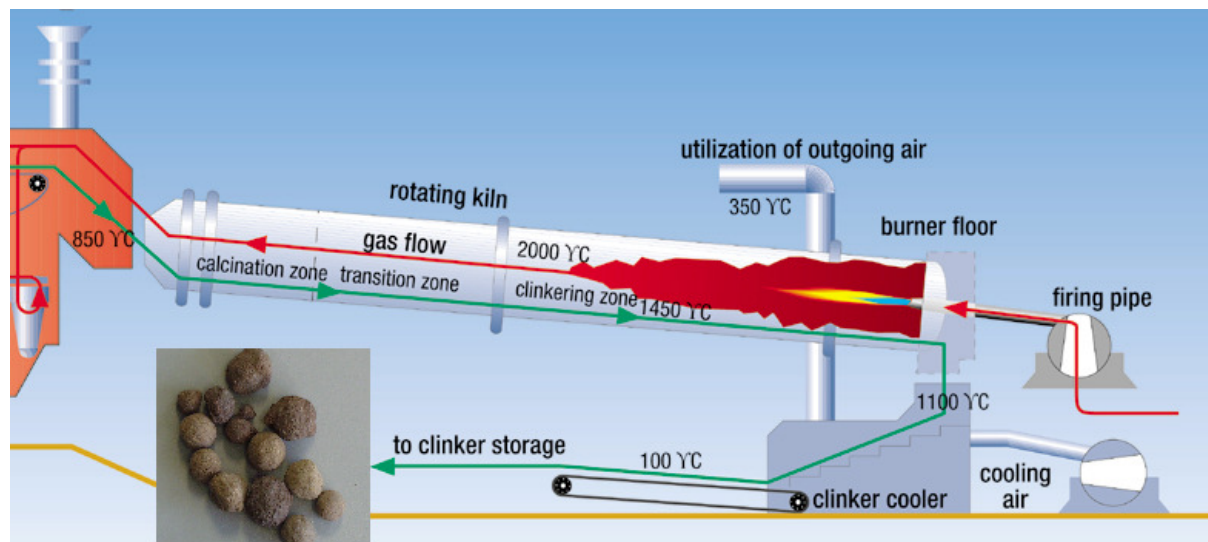
Eksploatacijom mineralne sirovine (najčešće vapnenac i lapor), bušenjem i miniranjem ili strojnim iskopom, dobiva se materijal širokog granulometrijskog sastava i nejednolikog kemijskog sastava. Veličina zrna može se kretati od nekoliko milimetara pa do 1,5 ili više metara, a kemijski sastav varira kako se prostorno mijenja sastav ležišta.

Potreban granulometrijski sastav sirovine razlikuje se kako se razlikuju postrojenja za proizvodnju cementa, a ovisi o korištenim drobilicama. Najčešće su kamenolomi povezani u proizvodni proces i drobilice se nalaze u sklopu postojenja za proizvodnju cementa, međutim postoje i slučajevi gdje je potrebno je prethodno prilagoditi granulometrijski sastav i tipični je zahtjev da zrna materijala budu u rasponu 30 – 150 mm.

Ujednačeni kemijski sastav mineralne sirovine vrlo je važan za kvalitetu i svojstva cementa, stoga se mineralna sirovina predhomogenizira. Ovo se postiže uzimanjem uzoraka iz minskih bušotina radi kemijske analize, tako se dobivaju podaci o raspodjeli kemijskog sastava stijenske mase. Kod povoljnog rasporeda mineralnih supstanci u ležištu, odminirana sirovina se može homogenizirati već pri utovaru i transportu. Ili se pak predhomogenizacija odvija na deponijama tako što se sirovina deponira vertikalno u slojevima a eksploatira horizontalno presijecajući slojeve.

Ovako homogenizirani i granulometrijski obrađeni materijal čini ulazni materijal postrojenja u proizvodnji cementa.

Daljnji proces se sastoji od mljevenja potrebnih sirovina na veličinu zrna tipično ispod 90 μm , te doziranja i miješanja istih sirovina, čiji omjeri ovise o sastavu pojedine sirovine te vrste cementa koji se proizvodi. Iz ovako pripremljene mješavine, na visokoj temperaturi (1400-1500 $^{\circ}\text{C}$) u rotacionoj peći nastaje klinker (slika 1). Rotaciona peć je u osnovi čelični cilindar promjera nekoliko metara i dužine 50 – 200 metara, iznutra obložen visokotemperaturnim ciglama. Blago je nagnut na jednu stranu i na donjem kraju opremljen plamenikom, dok gornji kraj čini ulaz za sirovinu. Rotacija oko uzdužne osi uzrokuje postupno gibanje materijala s višeg, hladnijeg kraja prema nižem, gdje se na koncu ispušta i hladi.



Slika 1 Rotacijska peć za proizvodnju klinkera

U rotacijskoj peći se odvija niz reakcija od kojih su neke vrlo kompleksne (evaporacija volatila, kalcinacija¹, sinteriranje², taljenje, raspadanje postojećih minerala i formiranje novih, hlađenje) a njihov produkt su granule klinkera, tamno smeđe boje i veličine 1-25 mm. Dobiveni klinker se tada melje na dimenzije cementa (slika 2) uz istovremeno dodavanje gipsa i eventualno drugih dodataka.

Tipični suvremeni proces proizvodnje cementa prikazan je na slici 3. Radi se o suhom postupku proizvodnje cementa u rotacijskoj peći, s predgrijačem i predkalcinatorom.

Sitne čestice mljevene i miješane sirovine u suhom stanju zagrijavaju se u tornju za predgrijavanje ili predgrijaču. Predgrijač je niz od 4 do 5 aerociklona gdje sirovinsko brašno prolazi kroz protustruju vrućeg zraka, stvorenu koristeći toplinu peći i toplinu hlađenja klinkera. Na taj način je omogućen vrlo efikasan prijenos topline na čestice sirovine, koja se pri tome djelomično kalcinira i oslobađa od vlage prije ulaska u rotacijsku peć. Nakon izlaska iz peći klinker se hladi u uređaju za hlađenje a toplina dobivena hlađenjem se ponovno iskorištava u tornju za predgrijavanje. Najnovije dostignuće u proizvodnji ovim postupkom je predkalcinator, uređaj koji funkcionira na istom principu kao i predgrijač a nalazi se između predgrijača i peći. Ovdje se uz dodatak goriva postižu veće temperature te se prije ulaska u peć kalcinira 80-90 % sirovine.

¹ Kalcinacija je proces termalne obrade mineralnih supstanci, na visokoj temperaturi ali ispod temperature taljenja, i provodi se u svrhu evaporacije volatila, redukcije i oksidacije, raspadanja (npr. kalcijev karbonat pri visokoj temperaturi otpušta ugljikov dioksid i nastaje kalcijev oksid ili živo vapno: $\text{CaCO}_3 + \text{toplina} \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$)

² Sinteriranje je proces stvaranja adhezije među česticama praha utjecajem visoke temperature ali ispod temperature taljenja (npr. sitno mljevene čestice sirovina za proizvodnju cementa, na visokoj temperaturi u rotacijskoj peći, međusobno se povezuju i tako okrupnjuju tvoreći klinker)

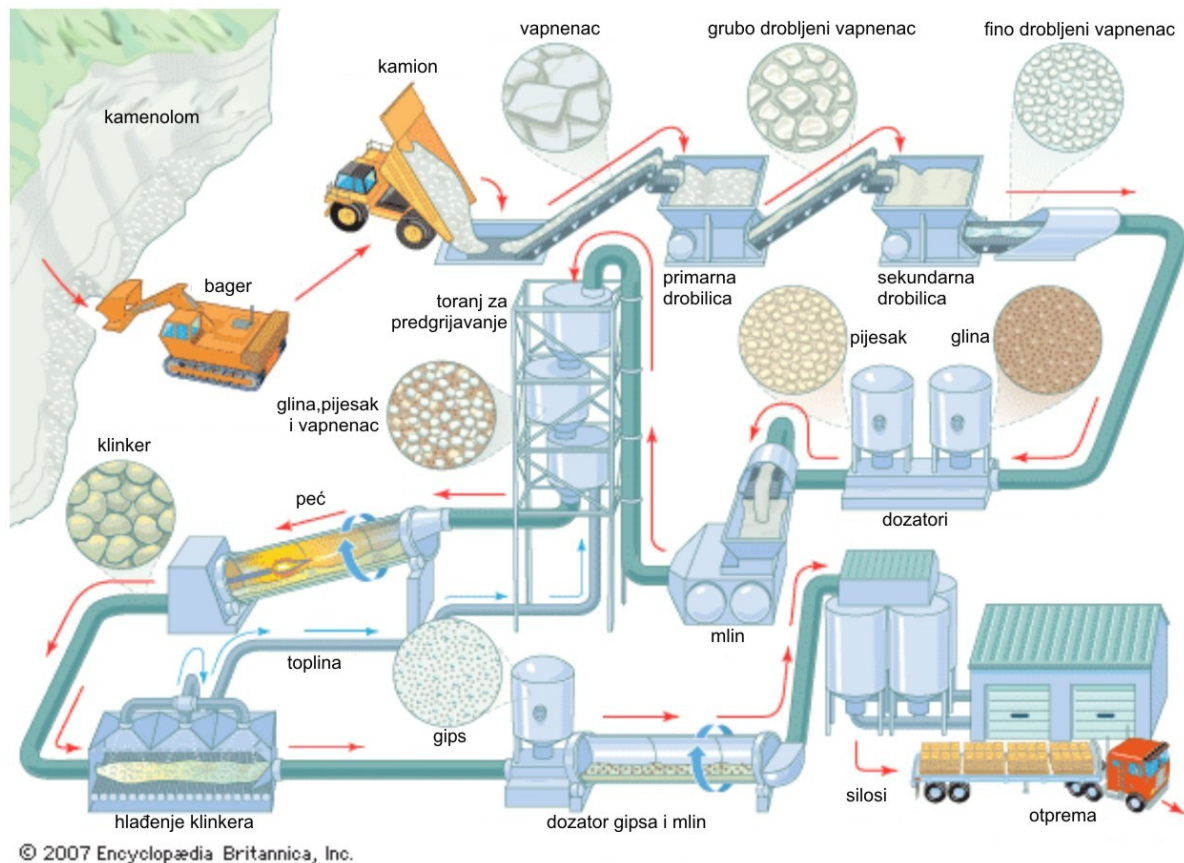


Slika 2 Unutrašnjost mlina s kuglama za mljevenje klinkera

Postoje i drugi postupci proizvodnje cementa a razlikuju se upravo u gore opisanom segmentu (vrsta peći, predgrijač i predkalcinator, vrsta hladnjaka te suho ili mokro stanje suspenzije). Prvi postupak proizvodnje cementa bio je mokri postupak, gdje suspenzija sirovine i vode ulazi neposredno u peć bez predgrijavanja, a prednost mu je bila tehnološka jednostavnost miješanja sirovina u obliku vodene suspenzije. Ovaj postupak se napušta zbog male energetske učinkovitosti, naime kod mokrog postupka se mnogo energije troši na evaporaciju vode iz suspenzije, a toplina iz peći i hlađenja klinkera se ne 'reciklira' u tornju za predgrijavanje. Iz specifične potrošnje energije za pojedine postupke proizvodnje, prikazane u tabeli 1, vidljivo je da suvremeni postupci imaju značajno veću energetska učinkovitost.

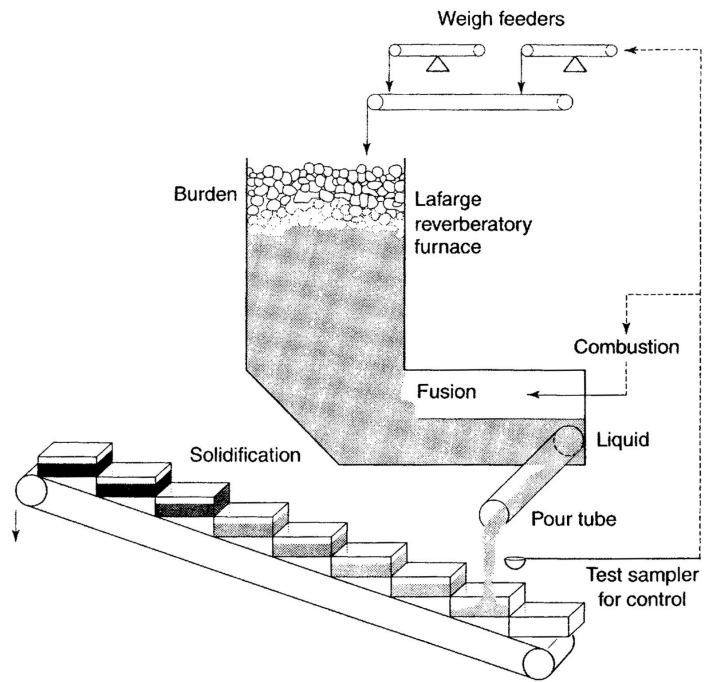
Tabela 1 Potrošnja energije za različite postupke proizvodnje cementa

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 (predgrijač i predkalcinator)	2900 do 3300
Teorijska toplina reakcije	1700 do 1800



Slika 3 Moderni postupak proizvodnje cementa

Osim rotacijskih peći, za proizvodnju cementa koriste se i vertikalne (šahodne) peći gdje nije potrebno mljevenje sirovine, već samo drobljenje jer klinker nastaje taljenjem (slika 4), dok je kod rotacionih peći za nastanak klinkera dominantno sinteriranje sitnih mljevenih čestica. Vertikalne peći se koriste za proizvodnju nekih vrsta specijalnih cementa, među koje spada i aluminatni (naziva se još taljenim ili boksitnim cementom).



Slika 4 Verikalna peć (lijevo) i klinker dobiven taljenjem (desno)

Sirovine za proizvodnju cementa

Za proizvodnju cementa upotrebljava se više vrsta mineralnih sirovina, od kojih su primarni vapnenac i lapor, zatim glina, pijesak, tufovi, boksit, rude željeza, gips i dr. Također se koristi industrijski otpad poput talioničke troske i letećeg pepela. Bitno je da sirovine budu izvor minerala potrebnih za formiranje klinkera ili pak izvor potrebnih aditiva koji se dodaju pri meljavi klinkera, a koje sirovine će se upotrijebiti ovisi o dostupnosti ovih sirovina na nekom području te o vrsti i svojstvima cementa koji se proizvodi.

Osnovni kemijski spojevi koje čine klinker su kalcijevi silikati, kalcijevi aluminati i kalcijevi aluminoferiti. Ovi spojevi tvore četiri najzastupljenija minerala u klinkeru, a to su alit, belit, aluminat i ferit (tabela 2). Iz kemijskog sastava ovih minerala vidljivo je i koji su oksidi najzastupljeniji u klinkeru, kalcijev oksid (CaO), silicijev dioksid (SiO₂), aluminijev oksid (Al₂O₃) i željezov oksid (Fe₂O₃). Važno je napomenuti da ovi oksidi u klinkeru ne postoje kao slobodni oksidi, već međusobnim spajanjem tvore gore navedene minerale, iako u cementu može postojati mali udio slobodnog kalcijevog oksida (živo vapno - CaO). Notacija u obliku oksida koristi se jer kemijska analiza kao rezultat daje sadržaj pojedinih oksida, pa je tako moguće udjelom oksida izraziti i sastav, odnosno vrstu cementa.

Tabela 2 Četiri osnovna minerala koji tvore klinker

Naziv minerala	Približna kemijska formula	Zapis u obliku oksida ³	Zapis u kemiji cementa ⁴	Udio u portland klinkeru [%]
Alit	Ca ₃ SiO ₅ trikalcijev silikat	3CaO×SiO ₂	C ₃ S	45 - 75
Belit	Ca ₂ SiO ₄ dikalcijev silikat	2CaO×SiO ₂	C ₂ S	7 - 32
Aluminat	Ca ₃ Al ₂ O ₆ trikalcijev aluminat	3CaO×Al ₂ O ₃	C ₃ A	0 - 13
Ferit	2(Ca ₂ AlFeO ₅) tetrakalcijev alumino-ferit	4CaO×Al ₂ O ₃ ×Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	0 - 18

³ Kemijske analize stijena i minerala se najčešće provode u vidu određivanja sadržaja oksida, tako da je pogodno sastav zapisivati u obliku kombinacije tih oksida.

⁴ Budući se minerali sastoje od kombinacija oksida, da bi se skratila notacija u kemiji cementa su uvedeni simboli za svaki pojedini oksid (C-CaO, S-SiO₂, A-Al₂O₃, F-Fe₂O₃, f-FeO, M-MgO, T-TiO, H-H₂O, K-K₂O, N-Na₂O).

Primarni mineral potreban za proizvodnju klinkera je kalcijev karbonat (CaCO_3) koji je visoko zastupljen u vapnencima i nekim laporima. To je razlog zašto su ove sirovine važne za proizvodnju cementa. Osnovna reakcija u proizvodnji klinkera je kalcinacija kalcijevog karbonata u kojoj se on, pri temperaturi iznad $900\text{ }^\circ\text{C}$ u peći, razlaže na ugljični dioksid i kalcijev oksid ili živo vapno (CaO) prema jednažbi:



a kalcijev oksid dalje reagira s ostalim oksidima tvoreći ranije spomenute minerale klinkera.

Izvor ostalih glavnih oksida su već spomenute sirovine. Laporu su sedimentne stijene koje sadrže glinovite minerale (20-80%) i kalcit (80-20%), stoga su dobar izvor CaCO_3 , SiO_2 i ostalih oksida. Postoje ležišta kvalitetnog lapora koji već prirodno sadrže optimalan omjer kalcita i ostalih minerala, te se iz takvih lapora klinker portland cementa (silikatni cement) proizvodi bez dodatnih sirovina. Gdje su primarne sirovine nedovoljne kvalitete ili se proizvode cementi posebnih svojstava (miješani portland cement, aluminatni cement...), potrebno je kombinirati sirovine da bi se postigao željeni sastav. Gline i pijesci sadrže visoki udio SiO_2 , boksit Al_2O_3 , a rude željeza Fe_2O_3 . U tabeli 3 je primjer kemijskog sastava triju sirovina čijim se miješanjem u određenim omjerima dobiva tipični sastav sirovine za klinker portland cementa.

Gips je također česta sirovina u proizvodnji cementa, međutim ne sudjeluje u reakcijama tvorbe klinkera u peći, već se dodaje pri mljevenju klinkera a za svrhu ima reguliranje vremena vezivanja cementa, tj. usporenje (retardant). U tipičnom portland cementu njegov udio je 2-4 %. Gips se dobiva rudarenjem iz prirodnih ležišta ili kao produkt čišćenja dimnih plinova termoelektrana (odsumporavanje). Uz gips, česti dodaci pri mljevenju klinkera su pucolani (industrijski - leteći pepeo i silicijska prašina, prirodni – tufovi), zatim talionička troska i vapnenac koji pridonose svojstvima poput vodonepropusnosti i otpornosti na agresivne uvjete, sulfate i alkalije, zatim topline hidratacije i visoke rane čvrstoće betona. Talionička troska⁵, leteći pepeo⁶ i silicijska prašina⁷ čine industrijski otpad kojim je moguće regulirati svojstva cementa, ali njihova primjena ima i jednu veliku prednost sa stajališta očuvanja okoliša. Naime, svjetska proizvodnja cementa je u porastu, a u proizvodnji klinkera se koriste velike količine energije i pri tome se CO_2 dobiven kalcinacijom otpušta u atmosferu. Ovi materijali, svojstvima slični klinkeru, služe kao zamjena za klinker te se njihovim dodatkom proizvode cementi i sa manje od 40 % klinkera u svome sastavu. Na taj način se postiže ušteda energije i sirovina te manje emisije štetnih plinova.

⁵ Zgura visoke peći (troska) je nusprodukt ekstrakcije željeza iz željezne rude, sastoji se primarno od silikata i alumosilikata kalcija koji se formiraju u otopljenom stanju zajedno sa željezom u visokoj peći

⁶ Leteći pepeo je kruti ostatak pri izgaranju ugljena koji se filtrima izdvaja iz dimnih plinova

⁷ Silicijska prašina je nusprodukt u proizvodnji silicijskih i ferosilicijskih legura

Tabela 3 Primjer kemijskog sastava sirovina za portlanski klinker

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

Vrste i svojstva silikatnog cementa

Upotreba cementa u neku svrhu postavlja određene zahtjeve na svojstva cementa, o kojima ovisi njegova primjenjivost. Ta svojstva ovise o više faktora među kojima su najznačajniji sirovine korištene u proizvodnji klinkera i dodaci cementu. Osim toga na svojstva cementa utječe i proizvodni proces, npr. vrsta i sastav goriva, temperatura u peći, brzina hlađenja klinkera, itd., međutim kako je ovdje riječ o mineralnim sirovinama težište će biti na njima i njihovom utjecaju na svojstva cementa.

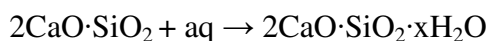
Već je spomenuto da udio pojedinih sirovina u mješavini određuje formiranje minerala klinkera, a o sastavu klinkera i dodataka cementu ovise svojstva betona pri ugradnji, vezivanju te u očvrsum stanju tokom uporabe, i to na slijedeći način.

Alit ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) je najzastupljeniji mineral silikatnog klinkera, veže s vodom (hidratizira) uz oslobađanje znatne količine gašenog vapna ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) i topline.



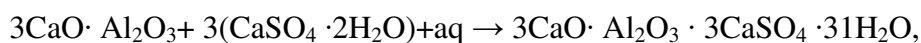
Potpunom hidratacijom oslobodi 500 J/g topline. Brzo razvija čvrstoću tokom prvih 7 dana i najviše doprinosi konačnoj čvrstoći cementa.

Belit ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) je drugi po redu najzastupljeniji mineral silikatnog klinkera. Hidratizira, kao i alit, uz oslobađanje gašenog vapna i topline ali u znatno manjoj mjeri.



Toplina hidratacije iznosi 260 J/g. Jednoliko pridonosi razvoju čvrstoće cementa kroz prvih 28 dana, a nakon toga je glavni nosilac prirasta čvrstoće. Pojavljuje se u 4 kristalne modifikacije, od čega samo β modifikacija ima vezivna svojstva. Ova modifikacija nastaje naglim hlađenjem klinkera, i to je razlog zašto je hlađenje klinkera bitna faza u proizvodnji cementa.

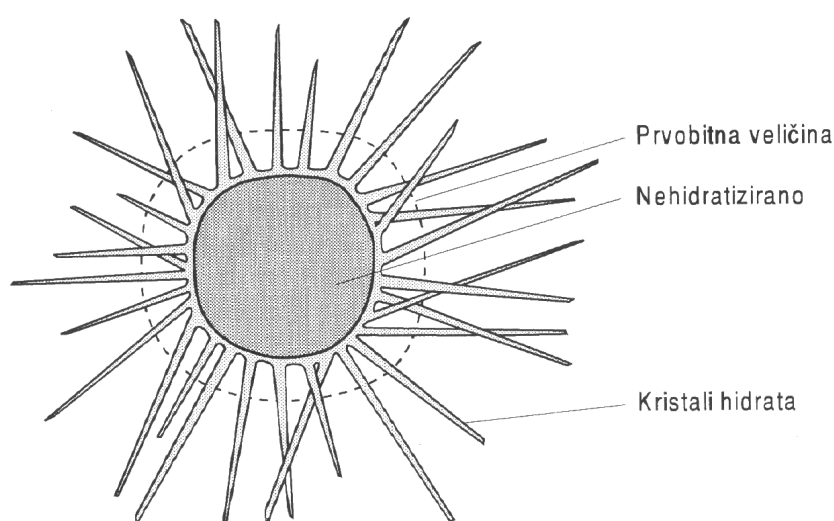
Trikalcij aluminat ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) se pojavljuje u kristalnom i amorfnom obliku. U kontaktu s vodom vrlo brzo hidratizira, što dovodi do smanjanja obradivosti betona. Stoga se cementu dodaju sulfati, odnosno **gips** da bi se usporila reakcija hidratacije. Kristalni oblik hidratizira bez obzira na sulfate i zato je nepoželjan u cementu. Potrebni amorfn oblik se dobiva naglim hlađenjem klinkera. Način na koji se usporava reakcija hidratacije je slijedeći: vezanjem gipsa i aluminata u prisustvu vode nastaje mineral etringit



koji obavija čestice cementa i tako sprječava daljnji kontakt čestica cementa i vode, tj. hidrataciju. Nakon nešto više od jednog sata, ovojnica puca i mineral etringit dalje kristalizira u zrnca igličastog oblika, koja se međusobno isprepliću (Slika 5). Etringit je nestabilan te nakon cca 16 sati veže vapno nastalo hidratacijom alita i belita, te prelazi u stabilni kalcij-aluminatni hidrat



Ova reakcija oslobađa gips i znatne količine vode, koja isparava ostavljajući pore u betonu. Ovakvo djelovanje vode je jedan od razloga zašto velika količina trikalcij aluminata nije poželjna u cementu.



Sl. 8. Presjek zrna hidratiziranog cementa (shema)

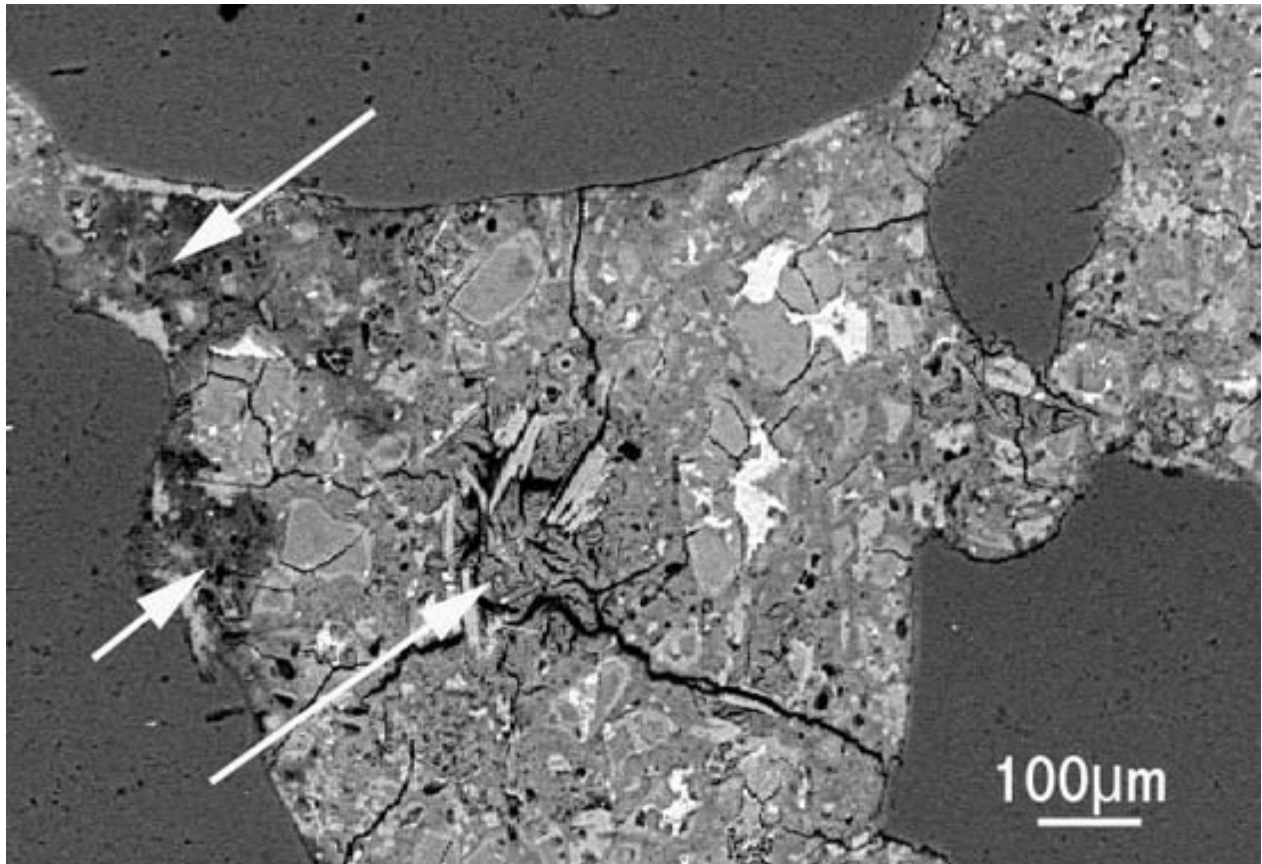
Slika 5 Kristalizacija etringita

Drugi razlog je **sulfatna korozija** betona. Pod utjecajem voda koje sadrže sulfatne soli (podzemna voda u sadrenim terenima, otpadna voda, morska voda...), u porama betona nastaje mineral etringit. Za razliku od svježeg betona, gdje etringit ima pozitivno djelovanje pri hidrataciji, u očvrslom betonu je njegova pojava štetna. Kristalizacijom etringita povećava se njegov volumen, što uzrokuje unutarnja naprezanja u betonu i pojavu pukotina.

Aluminat pridonosi vrlo brzom razvoju čvrstoće unutar prvih 24 sata i oslobađa više topline pri hidrataciji nego ostali minerali, 870 J/g.

Celit ili feritna faza ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) daje različite hidrate, većinom slične hidratima trikalcij aluminata. Uz razliku što ovi ne stvaraju etringit pod utjecajem sulfatnih voda. Ujednačeno pridonosi razvoju čvrstoće u svim periodima i nije bitan za konačnu čvrstoću. Oslobađa umjerenu toplinu hidratacije, 420 J/g. Ako se želi umanjiti udio trikalcij

aluminata, zbog mogućih štetnih efekata, dodaje se željezna ruda u sirovinsko brašno. Tako se formira više feritne, a manje aluminatne faze klinkera.



Slika 6 Sulfatna korozija cementnog kamena

Vapno ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), koje se oslobađa pri hidrataciji alita i belita, može činiti 15 – 20% mase cementnog kamena. Uz sulfatnu koroziju hidrata trikalcij aluminata, gotovo sve vrste korozije betona nastaju reakcijom agresivne tvari sa ovim vapnom. Sprečavanje korozije može se postići na više načina:

- proizvodnjom klinkera sa manjim udjelom alita, budući od oslobađa najviše vapna
- dodatkom *troske* pri meljavi, budući je troska građena uglavnom od belita te tako zamjenjuje dio alita
- dodatkom pucolana⁸ (*leteći pepeo, silisijka prašina, tufovi*) pri meljavi, jer oni vežu vapno pri hidrataciji cementa i tako smanjuju njegov udio u cementnom kamenu

⁸ Pucolani su silikatni i aluminatni materijali koji u prisustvu vode reagiraju s vapnom (kalcijev hidroksid) tvoreći hidrate

- proizvodnjom klinkera sa manjim udjelom ili bez aluminatne faze, budući su ovi hidrati podložni sulfatnoj koroziji

Osim otpornosti na agresivne uvjete, podešavanjem sastava klinkera reguliraju se i druga svojstva. Cement sa manjim udjelom alita i aluminatne faze ima nižu toplinu hidratacije, budući ovi minerali oslobađaju najviše topline. Nasuprot tome, cement s više alita postiže veću ranu čvrstoću (Tabela 4).

Tabela 4 Sastavi klinkera silikatnog cementa

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

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

Čisti portland cement sastoji je od minerala klinkera i dodatka gipsa. Međusobni odnos glavnih minerala u klinkeru određuje svojstva cementa. Stoga se sastav sirovine podešava tako da se dobije klinker s određenim udjelom glavnih minerala (tabela 4) i na taj način se reguliraju svojstva te proizvode cementi s izraženom ranom čvrstoćom, niskom toplinom hidratacije ili otpornošću na sulfate i kiseline.

Portland cement s dodacima proizvodi se mljevenjem običnog portland klinkera uz dodatak gipsa i dodatak do 35% troske, pucolana (leteći pepeo, silicijska prašina, pečeni škrljac) ili vapnenca. Ovaj cement je svojstvima sličan portland cementu ali dodatak troske ili pucolana snižava toplinu hidratacije pri vezanju betona i povećava otpornost na sulfate, dok

dodatak vapnenca smanjuje propusnost betona. Ovakvi cementi se proizvode uz dodatak jedne komponente ili njihove mješavine.

Metalurški cement, pucolanski cement i miješani cement se proizvode mljevenjem portlandskog klinkera uz dodatak više od 35% troske, pucolana ili njihove mješavine. Ovi cementi imaju nisku toplinu hidratacije i izrazitu otpornost na kemijske utjecaje.

Bijeli cement je prema sastavu čisti portland cement ali se klinker proizvodi iz vapnenaca visoke čistoće i kaolina (gline) bijele boje. Tj. sirovina sa vrlo malim udjelom željezovih spojeva (Fe_2O_3) koji inače daju boju običnom portland cementu. Mljevenje ovog klinkera se vrši u mlinovima s porculanskim kuglama i oblogom, kako čestice trošenja mlina ne bi bojale cement. Uz čvrstoću, važno svojstvo je njegova bjelina koja povećava dekorativnost betonskih konstrukcija.

Tabela 5 Označavanje vrste i klase cementa

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 hidr. svojstava
	T	škrljavec 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	filtarski prah
Klasa cementa	32,5	tlačna čvrstoća nakon 28 dana (MPa)
	42,5	
	52,5	
Prirast čvrstoće	N	normalni
	R	visoka rana čvrstoća

Uvjeti kvalitete sirovina za silikatni cement

Osim već navedenih, glavnih oksida (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 i Fe_2O_3), cementne sirovine sadrže druge primjese u obliku minerala ili oksida. Sporedni sastojci su magnezijev oksid (MgO), sumporni trioksid (SO_3) i alkalije (Na_2O i K_2O), u manjim količinama mogu biti prisutni manganov oksid (MnO), fosforni pentoksid (P_2O_5), titanov dioksid (TiO_2), barijev oksid (BaO) i klor (Cl).

U cementnoj industriji često se upotrebljavaju moduli koji izražavaju omjere glavnih oksida u klinkeru. Na taj način se određuje kvaliteta sirovina, sirovinskih mješavina i klinkera.

Hidraulični modul je omjer CaO naspram ostalih glavnih oksida:

$$HM = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}, \text{ i kreće se od } 1,7 \text{ do } 2,2.$$

Silikatni modul definira omjer SiO_2 prema Al_2O_3 i Fe_2O_3 :

$$SM = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}, \text{ i kreće se od } 1,7 - 3,5.$$

Aluminatni modul je omjer Al_2O_3 i Fe_2O_3 :

$$AM = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}, \text{ a vrijednost mu je između } 1,5 - 2,4.$$

Najvažniji modul je stupanj zasićenja, SZ koji se računa prema formuli:

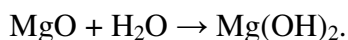
$$SZ = \frac{100CaO}{2,8SiO_2 + 1,2Al_2O_3 + 0,65Fe_2O_3}, \text{ i mora biti između } 85 - 102\%.$$

Ovaj modul pokazuje udio CaO koji će se, u normalnom procesu pečenja i hlađenja klinkera, vezati za ostale glavne okside tvoreći minerale klinkera. Idealna vrijednost stupnja zasićenja je 100%, međutim u procesu proizvodnje ona se postiže samo približno.

Dok udio glavnih oksida u sirovinskoj mješavini određuje formiranje minerala klinkera i slobodnog vapna (CaO), sporedni sastojci mogu imati negativan utjecaj na svojstva cementa.

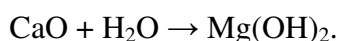
Magnezijev oksid javlja se u kristalnom ili amorfnom obliku. Amorfnu MgO odmah hidratizira i nema posebnog štetnog djelovanja na svojstva očvrstlog cementa. Nastaje pri naglom hlađenju klinkera i u cementu ga smije biti do 5%. Kristalni MgO teško je topiv u

vodi i sporo hidratizira. U količini do 1% ugrađuje se u kristalnu rešetku glavnih cementnih minerala a ostatak hidratizira nakon očvršćavanja cementa:



Nastali hidroksid ima povećani volumen, što izaziva unutarnja naprezanja i pukotine u očvrstloj masi. Ovaj efekt se manifestira kao nepostojanost volumena betona i stoga standardi ograničavaju ukupni sadržaj MgO u cementu na najviše 5%.

Kalcijev oksid, iako je normalni sastojak cementa, može imati štetno djelovanje. Sirovine za cement nije moguće idealno miješati i homogenizirati. Zato preostaje dio CaO koji se pri pečenju ne veže u cementne minerale i naziva se slobodno vapno. Ono nastaje na višoj temperaturi nego pri proizvodnji građevinskog vapna i stoga se naziva prepečenim. Hidratizira vrlo sporo i to u očvrstlom cementnom kamenu:



Izaziva nepostojanost volumena betona, jednako kao i MgO. Opasnost od nepostojanosti volumena se izbjegava ako je udio slobodnog vapna u cementu manji od 2%.

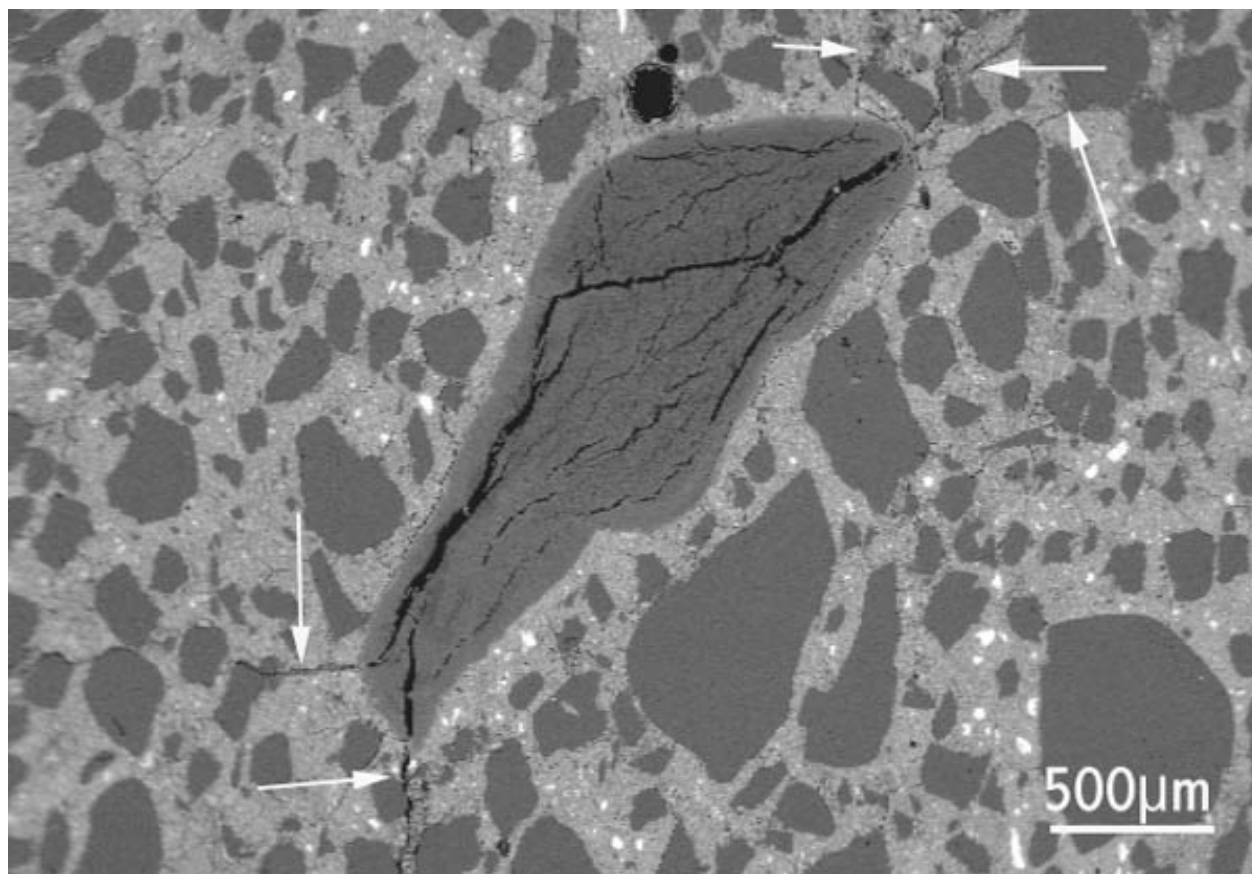
Alkalije, Na₂O i K₂O u kontaktu sa vodom gotovo trenutno prelaze u hidrokside, NaOH i KOH. U dužem kontaktu sa zrakom, koji uvijek ima nešto vlage i CO₂, najprije vežu vlagu, a zatim i CO₂ te prelaze u karbonate. Natrijev i kalijev karbonat (Na₂CO₃ i K₂CO₃) ubrzavaju vezanje cementa te mogu izazvati lažno vezanje, što je štetna pojava. U gotovom betonu, u kontaktu s agregatom, alkalije mogu izazvati alkalno-silikatnu reakciju. Osim toga, alkalije iz cementa spadaju u jake lužine, vodena otopina koja je komponenta cementne paste, oštećuje sve organske tvari pa tako može i nagrasti kožu.

Alkalno-silikatna reakcija je najviše izražena vrsta alkalno-agregatne reakcije, koja se javlja između agregata betona i alkalija koje sadrži cement. Ako agregat sadrži SiO₂ u amorfnom obliku, u očvrstlom betonu može doći do ovakve reakcije, pri čemu novonastali spojevi imaju veći volumen nego spojevi koji su ušli u kemijsku reakciju. Na taj način nastaju unutarnja naprezanja, što dovodi do pukotina u betonu. Alkalno-silikatna reakcija nastaje ako cement sadrži više od 0,5% alkalija i ako je beton izložen vlazi.

Ova reakcija može se spriječiti:

- upotrebom niskoalkaličnog cementa (sirovine sa niskim udjelom alkalija)
- dodavanjem *pucolana* koji sadrži amorfnu SiO₂. Fino mljeveni pucolani odreagiraju s alkalijama dok je beton svjež, što nije štetno.

Druga vrsta alkalno-agregatne reakcije je **alkalno-dolomitna**. Manje je izražena a javlja se ako agregat sadrži reaktivni dolomitni vapnenac i na temperaturama iznad 30 °C. Posljedice su jednake kao kod alkalno-silikatne reakcije.



Slika 7 Alkalno-agregatna reakcija

Ostali oksidi poput P_2O_5 , TiO_2 i BaO mogu biti prisutni u manjim količinama. Iako se smatraju štetnim primjesama, nije zabilježeno štetno djelovanje ovih oksida na svojstva cementa.

Vrste i svojstva aluminatnog cementa

Aluminatni cement spada u specijalne cemente a proizvodi se meljavom klinkera, dobivenog taljenjem ili sinteriranjem. Kemijski i mineraloški se bitno razlikuje od silikatnog cementa (tabela 6). Glavni mineral je monokalcijev aluminat (CA) kojeg sadrži preko 45 %.

Tabela 6 Kemijski sastav silikatnog i aluminatnog klinkera

	High-Alumina Cement		Portland Cement
	Low Iron (CAC50) [†]	High Iron (CAC40) [‡]	
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.
 † Medium-grade calcium aluminate cement.
 ‡ Low-grade calcium aluminate cement.

Vrsta i svojstva cementa ovise o primjenjenom postupku (sinteriranje, teljenje) i uporabljenim sirovinama. Većina aluminatnog cementa proizvodi se taljenjem vapnenca i boksita. U manjim količinama proizvodi se cement sa vrlo visokim udjelom aluminata, postupkom sinteriranja, gdje umjesto boksita koristi aluminijev oksid (glinica).

Aluminatni cement se klasificira i označava prema udjelu aluminata, gdje je osnovna oznaka KAC (kalcij aluminatni cement) a zatim slijedi brojka udjela aluminata. Tri su osnovne skupine aluminatnog cementa:

- Cement sa niskim udjelom aluminata (npr. KAC 40),
- Cement sa srednjim udjelom aluminata (npr. KAC 50),
- Cement sa visokim udjelom aluminata (npr. KAC70).

Tabela 7 Klasifikacija aluminatnog cementa

Vrsta	Al ₂ O ₃ % (KAC)	Fe ₂ O ₃ %	SiO ₂ %	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

Cement sa niskim i srednjim udjelom aluminata proizvodi se iz vapnenca visoke čistoće i boksita koji može sadržavati različit udio željezova oksida, pa se često klasificira i kao cement s niskim sadržajem željeza ili cement s visokim sadržajem željeza.

Cement sa visokim udjelom aluminata proizvodi se iz vapnenca visoke čistoće i aluminijeva oksida, tj. glinice. Upotreba glinice umjesto boksita osigurava visoki udio aluminijeva oksida i nizak udio nečistoća, željeza i silicija. Ovaj cement se ne klasificira prema udjelu željeza, budući je njegov udio zanemariv.

Tabela 8 prikazuje prikazuje skupine aluminatnog cementa prema kemijskom sastavu (udio oksida), postupku proizvodnje i rezultirajućoj boji cementa. Taljenje se primjenjuje za cimente do cca. 50 % sadržaja aluminata, što uključuje cimente niskog, i neke srednjeg sadržaja aluminata, dok se cementi visokog sadržaja aluminata proizvode isključivo sinteriranjem.

Zahtjevi kvalitete sirovina za aluminatni cement se odnose na kemijski sastav, tj. omjere oksida u sirovinskoj mješavini. Kod postupka taljenja, osim kemijskog sastava postoje i zahtjevi na granulometrijski sastav, vlažnost i mineraloški sastav. Ovi zahtjevi proizlaze iz principa rada vertikalnih peći, gdje se sirovina prethodno ne melje već se korite granule 50-

100 mm. Tipične vrijednosti ovih parametara za cement s niskim do srednjim sadržajem aluminata prikazane su u tabeli 8.

Tabela 8 Zahtjevi kvalitete sirovina

Parameter	High-Alumina Cement	
	Low Iron (CAC50)*	High Iron (CAC40)†
Al ₂ O ₃ :SiO ₂	10:1 (minimum)	10:1 (minimum)
Al ₂ O ₃ :Fe ₂ O ₃	20:1 (minimum)	2.0–2.5:1 (preferred)
Al ₂ O ₃ :TiO ₂	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.

Svojstva aluminatnog cementa:

- Brzo stvrdnjavanje, 2-4 h
- Brzo postizanje čvrstoće, unutar 24 h
- Dobra vatrostalna svojstva
- Velika otpornost na sulfate
- Otpornost na kiseline
- Velika otpornost na abraziju
- Niske temperature primjene do –10 °C

Primjena aluminatnog cementa:

- U građevinarstvu – gdje postoje zahtjevi za brzim postizanjem čvrstoće
- Proizvodnja vatrostalnih betona i blokova, vezivo na visokim temperaturama kalupi (1200-1500°C)
- Samonivelirajući podovi
- Aditivi u PC i drugim građevnim materijalima
- Obloge otporne na sulfate, kiseline, koroziju i abraziju

Eksploatacija sirovina za proizvodnju cementa u Hrvatskoj

U Hrvatskoj danas postoje četiri proizvođača cementa, od kojih „Holcim“, „Dalmacijacent“ i „Našicecement“ proizvode silikatne cimente (čisti i miješani portland cement), dok „Istracement“ proizvodi specijalne, aluminatne cimente. Proizvodna postrojenja redovito su smještena u blizini eksploatacijskih polja radi manjih transportnih udaljenosti, tj. vezana su uz ležišta sirovina za proizvodnju cementa. Tako od dvadesetak lokacija na kojima su istraživane ili eksploatirane cementne sirovine, danas se eksploatira i proizvodi cement iz svega nekoliko ležišta:

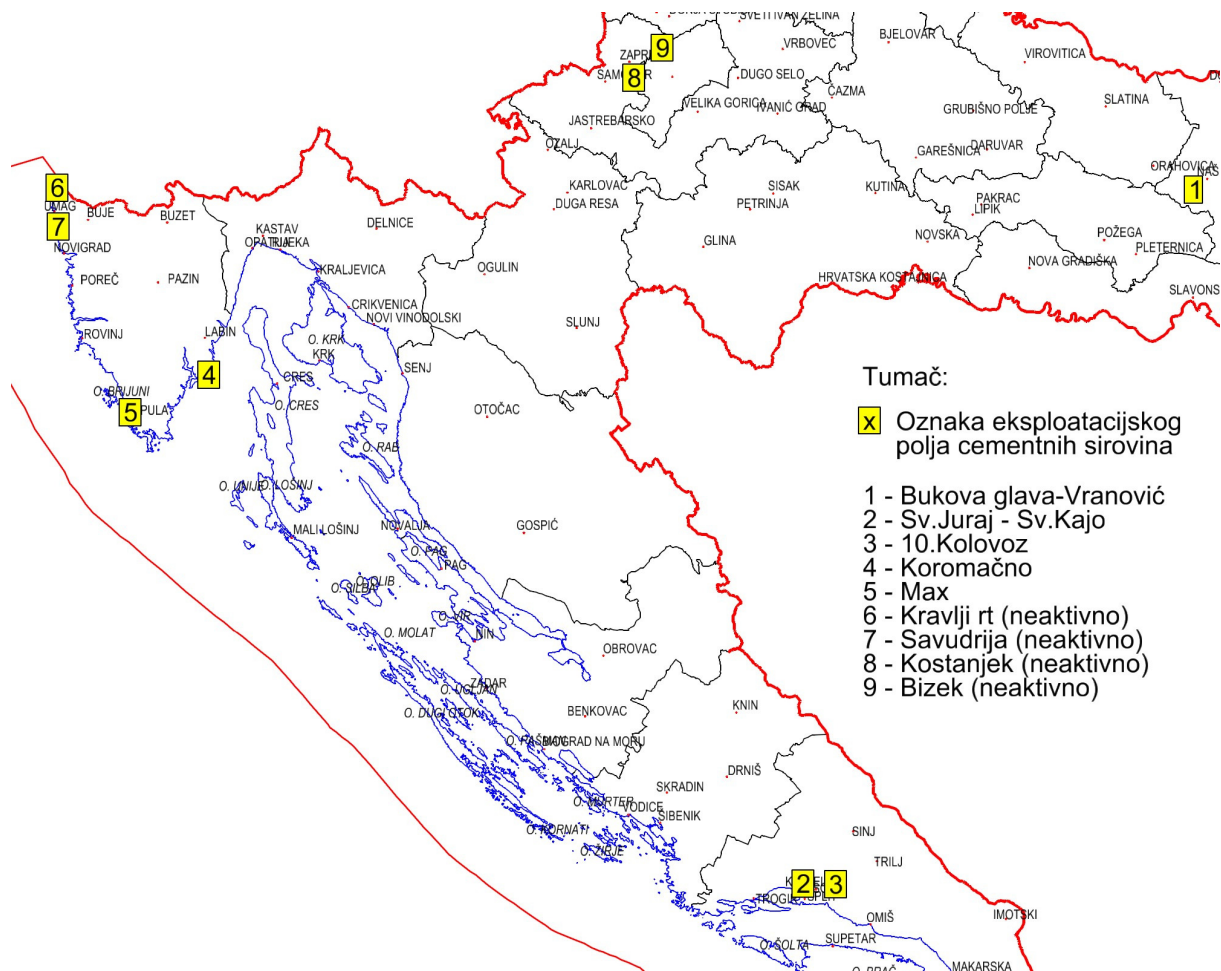
- Glinoviti lapori, lapori i vapnenci na Papuku (eksploatacijsko polje „Bukova glava“, nositelj koncesije „Našicecement“ d.d., Našice)
- Lapori i glinoviti vapnenci na Papuku (eksploatacijsko polje „Vranović“, nositelj koncesije „Našicecement“ d.d., Našice)
- Vapnenački lapori na Kozjaku kod Splita (eksploatacijska polja „Sv.Juraj-sv.Kajo“ i „10.kolovoz“, nositelj koncesije „Dalmacijacement“ d.d., Kaštel sućurac)
- Tuf na Svilaji kod Sinja (eksploatacijsko polje „Zelovo“, nositelj koncesije „Dalmacijacement“ d.d., Kaštel sućurac)
- Lapori i glinoviti vapnenci na Labinskom poluotoku (eksploatacijsko polje „Koromacno“, nositelj koncesije „Holcim hrvatska“ d.o.o., Koromacno)
- Eksploatacijsko polje „Max“, nositelj koncesije „Istracement international“ d.d., Pula

Ukupna proizvodnja cementa u Hrvatskoj iznosi 2,8 -3,5 milijuna tona godišnje (za period 2005-2010g., prema USGS-u) . Za usporedbu sa svijetskom proizvodnjom, tabela 7 prikazuje proizvodnju i proizvodne kapacitet za nekoliko najvećih proizvođača cementa.

Tabela 9 Svjetska proizvodnja i proizvodni kapaciteti cementa

World Production and Capacity:

	Cement production		Clinker capacity ^e	
	2009	2010 ^e	2009	2010
United States (includes Puerto Rico)	64,900	63,500	⁶ 114,000	⁶ 109,000
Brazil	51,700	59,000	50,000	55,000
China	1,629,000	1,800,000	1,300,000	1,500,000
Egypt	46,500	48,000	45,000	46,000
Germany	30,400	31,000	31,000	31,000
India	^e 205,000	220,000	250,000	260,000
Indonesia	^e 40,000	42,000	42,000	42,000
Iran	^e 50,000	55,000	50,000	57,000
Italy	36,300	35,000	46,000	46,000
Japan	54,800	56,000	63,000	63,000
Korea, Republic of	50,100	46,000	50,000	50,000
Mexico	35,200	34,000	42,000	42,000
Pakistan	^e 32,000	30,000	42,000	45,000
Russia	44,300	49,000	65,000	65,000
Saudi Arabia	^e 40,000	45,000	40,000	50,000
Spain	^e 50,000	50,000	42,000	42,000
Thailand	31,200	31,000	50,000	50,000
Turkey	54,000	60,000	63,000	65,000
Vietnam	47,900	50,000	50,000	55,000
Other countries (rounded)	^e 466,000	^e 520,000	^e 460,000	^e 470,000
World total (rounded)	^e 3,060,000	^e 3,300,000	^e 2,900,000	^e 3,100,000



Slika 8 Eksploatacijska polja cementnih sirovina u Republici Hrvatskoj

Ležište ‘Koromačno’

Geološke značajke šireg područja

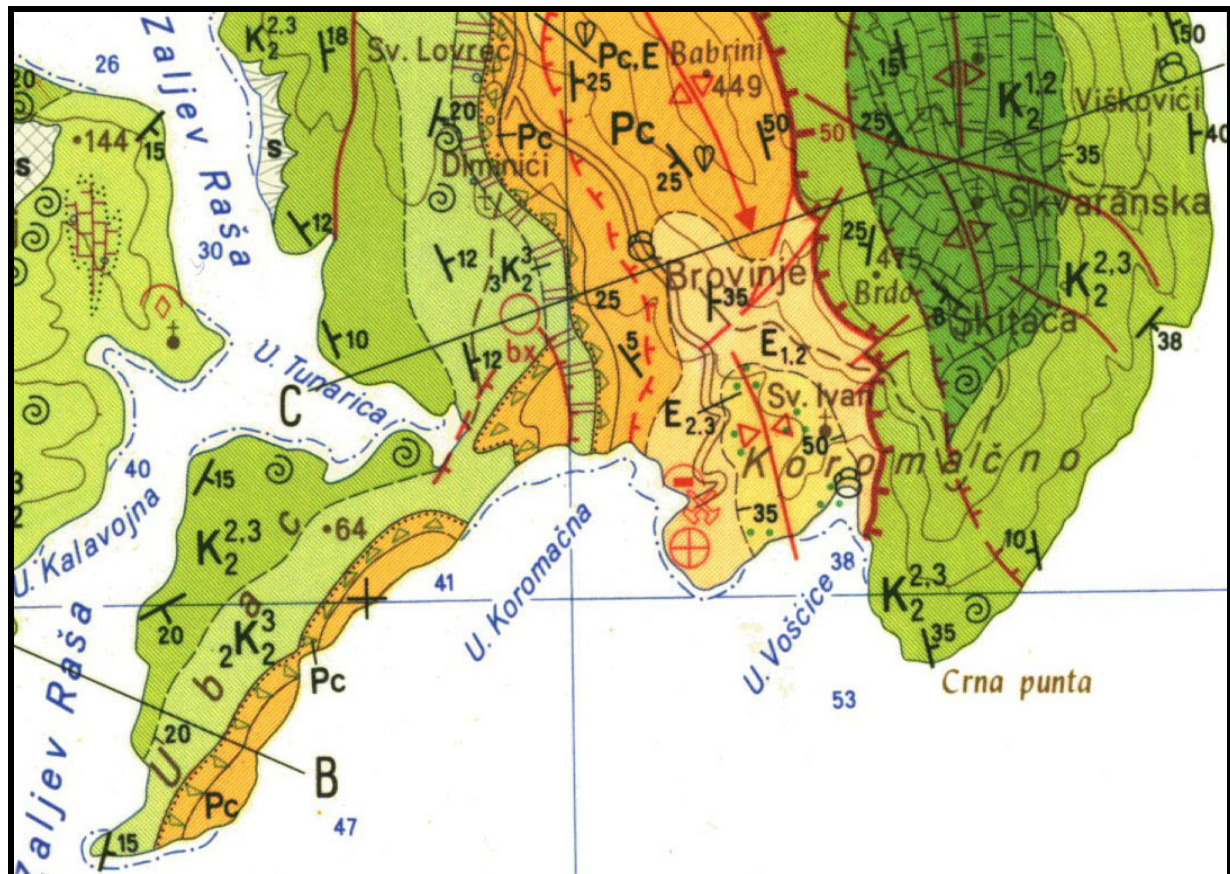
Šire područje eksploatacijskog polja “Koromačno” (Slika 9) izgrađuju karbonatne stijene gornjokredne starosti te sedimenti paleocena i eocena (liburnijske naslage, foraminiferski vapnenci i fliš). Mineralnu sirovinu za proizvodnju cementa čine foraminiferski vapnenci donjo do srednje eocenske starosti ($E_{1,2}$) te klastične naslage – fliš srednje do gornje eocenske starosti ($E_{2,3}$), među koje spadaju glinoviti vapnenci, razni varijeteti lapora te numulitne i vapnenačke breče.

Foraminiferski vapnenci donjeg do srednjeg eocena ($E_{1,2}$) izgrađuju veliki dio paleogenske sinklinale, koja se nalazi i unutar eksploatacijskog polja “Koromačno”. Sjeverno i sjeveroistočno su u kontaktu s liburnijskim naslagama. Na istoku su u anormalnom kontaktu s mlađim krednim vapnencima, a na jugu i jugozapadu ulaze u more.

Prijelaz iz liburnijskih naslaga u foraminiferske vapnence je postupan. Također je kontinuiran prijelaz unutar foraminiferskih vapnenaca (između miliolidnih, alveolinskih te numulitnih vapnenaca). Foraminiferske vapnence uglavnom izgrađuju smeđe-sivi i smeđi kalkareniti u kojima mjestimično prevladavaju kalciruditski elementi. Sadrže obično između 96 – 97% $CaCO_3$. Vapnene čestice su veličine od 0,09 – 0,14 mm, nepravilnog okruglastog oblika, vezane kalcitnim vezivom.

Lapori su istaloženi konkordantno u odnosu na foraminiferske vapnence. Granica između lapora i vapnenaca nije oštra, već nalazimo prelazne slojeve, tzv. gomoljaste lapore plavičasto-zelenkaste boje, koja potječe od glaukonita. Oksidacijom na zraku, boja im prelazi u rđavo-sivu.. Slojevi gomoljastih lapora debeli su cca 2 m, a prema gore postaju sve laporovitiji, dok ne pređu u plavičaste lapore. Vapnenačka komponenta u plavičastim laporima varira po pružanju i po debljini slojeva.

Različiti tipovi lapora eocenske starosti, koji čine kvalitetnu mineralnu sirovinu za proizvodnju cementa eksploatacijskog polja “Koromačno”, izgrađuju jezgru paleogenske sinklinale. S istočne strane lapori i biokalkareniti u rasjednom su kontaktu s foraminiferskim vapnencima. Sa zapadne strane pod fliške naslage normalno tonu foraminiferski vapnenci sa smjerom pada prema istoku. U krovini lapora dolazi sitnozrni vapneni pješčenjak, koji štiti lapore od jačeg utjecaja erozije. [8] Oscilacije unutar eocenskog bazena uvjetovale su intenzivnu izmjenu lapora i biokalkarenita, što se osobito dobro vidi prema rezultatima analiza uzoraka jezgre istražnih bušotina.



	Fliš sr. i g. eocena: lapori, kalkareniti i numulitne breče		Kristalinični bijeli slabije uslojeni vapnenci campana
	Foraminiferski vapnenci		Brašnati bijeli i svijetlosivi uslojeni vapnenci santona
	Uslojeni miolodni vapnenci		Pretežno uslojeni vapnenci sa proslojcima i lećama grebenskih vapnenaca
	Uslojeni vapnenci liburnijskih naslaga s brečama i ugljenom		Bijeli i svijetlosivi slabije uslojeni vapnenci
	Transgresivne breče		

Slika 9 Geološka karta šireg područja ležišta 'Koromačno'

Grada ležišta

Ležište mineralne sirovine za proizvodnju cementa "Koromačno" sedimentnog je tipa. Mineralnu sirovinu izgrađuju foraminiferski vapnenci, glinoviti vapnenci, različiti varijeteti lapora te numulitne i vapnenačke breče. Unutar eksploatacijskog polja "Koromačno" razlikujemo *autohtone* i *alohtone* sedimente (Slika 10 Situacija ležišta 'Koromačno' s rasporedom litoloških članova).

Autohtoni sedimenti su glinoviti vapnenci i različiti tipovi lapora. Oni zapunjavaju depresiju (paleogensku sinklinalu). Odlikuju se postojanošću i rasprostranjeni su unutar cijele sinklinale. Kontakti između različitih tipova lapora su kontinuirani i često nejasni.

Podinske naslage ležišta čine foraminiferski vapnenci eocenske starosti ($E_{1,2}$) (oznake CB), koji izgrađuju dno sinklinale.

Na njih su konkordantno taloženi glinoviti vapnenci (oznake G - grašo), debljine 50 – 70m u središnjem dijelu sinklinale.

Glinoviti vapnenci postupno prelaze u lapore sivo-plave boje (oznake M_{2,3} - magro). Prosječna debljina ovih lapora iznosi između 60 i 90 metara.

Slijede siliciklastični lapori (silificirani lapor, MS). Odlikuju se povećanim udjelom siliciklastične komponente. Prosječne debljine su oko 10 metara.

U slijedu autohtonih sedimentata, iznad siliciklastičnih lapora nalaze se sivo-plavi lapori (oznake M₁-M). Prosječna debljina naslaga ovih lapora iznosi 10 do 25 m.

Gornji sloj autohtonih sitnozrnih sedimentata predstavljaju lapori oznake M₀. Rasprostranjeni su samo u centralnom, vršnom dijelu eksploacijskog polja. Debljine su do 20 metara.

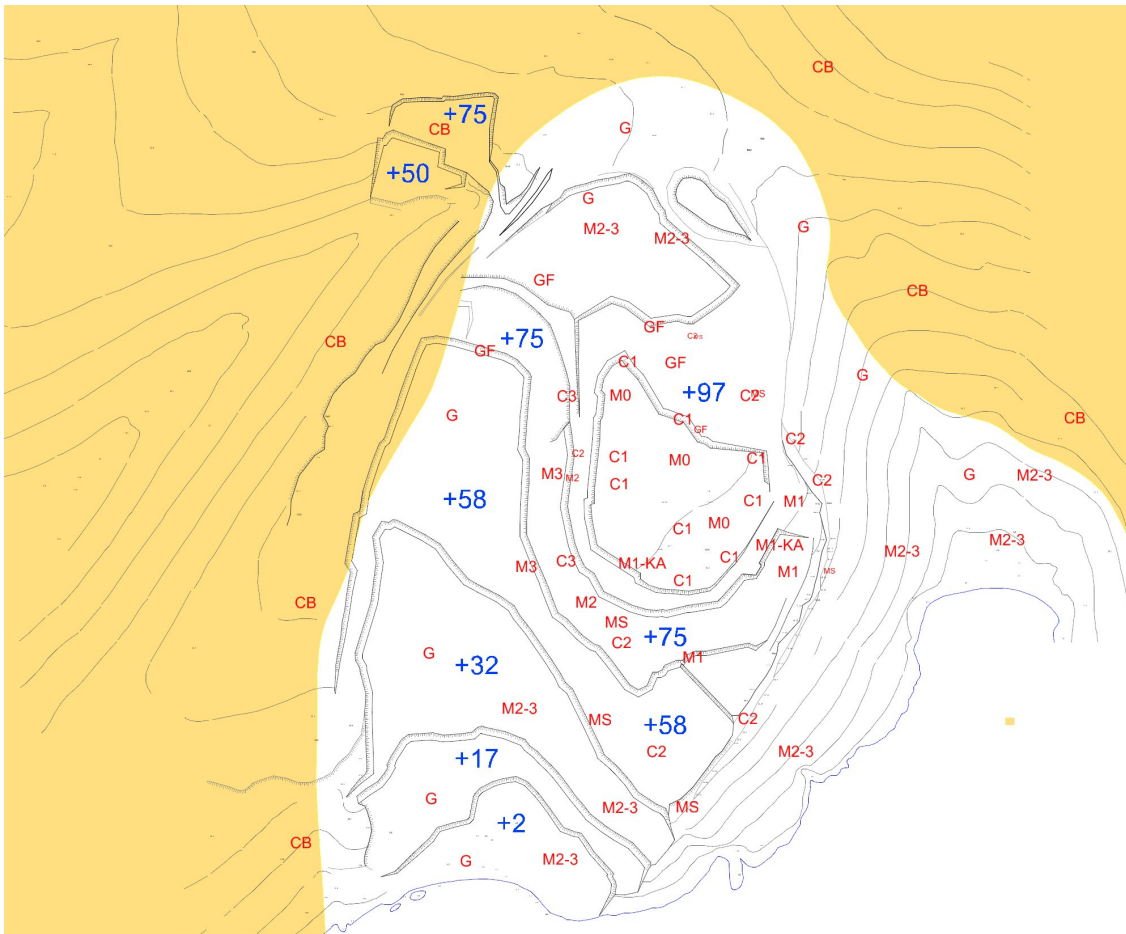
Alohtone sedimente ležišta “Koromačno” čine vapnenačke i numilitne breče (C₃, C₂ i C₁) te kalkareniti unutar lapora (M₁-K).

Unutar lapora oznake M_{2,3} nalazi se debritno tijelo vapnenačke breče (oznake C₃). Breča je izgrađena od fragmenata uglavnom foraminiferskih vapnenaca, veličine do nekoliko centimetara. Ova breča isklinjava u centralnom dijelu eksploacijskog polja u smjeru istoka, sjevera i juga, a kartirana je na istočnoj otkopnoj fronti iznad četvrte i pete etaže, na nadmorskoj visini između 65 i 80 metara. Prosječna debljina ove vapnenačke breče iznosi između 5 i 10 metara.

Vapnenački debrit izgrađen od fragmenata uglavnom foraminiferskih vapnenaca krupnoće oko 10 cm (C₂) prekriva cijeli centralni dio eksploacijskog polja. Prosječne debljine je preko 25 metara i najmoćnija je vapnenačka breča eksploacijskog polja.

Najmlađe debritno tijelo predstavljaju naslage izgrađene od kalkarenita (M₁-K), rasprostranjene u centralnom, vršnom dijelu sinklinale. Debljina kalkarenita iznosi do 15 m.

Gornji dio vapnenačkih naslaga izgrađuje sitnozrna vapnenačka i numulitna breča (C₁), rasprostranjena po cijelom centralnom dijelu eksploacijskog polja, izgrađena uglavnom od numulita i fragmenata foraminiferskog vapnenca veličine do nekoliko centimetara. Prosječna debljina naslaga tipa C₁ iznosi do 20 metara. Naslage kalkarenita i numulitne breče zahvaćene su eksploatacijom na samom vrhu eksploacijskog polja te ih nalazimo pri vrhu otkopnih fronti iznad pete etaže i u otkopnoj fronti šeste etaže.



Slika 10 Situacija ležišta 'Koromačno' s rasporedom litoloških članova

Određivanje kakvoće mineralne sirovine za proizvodnju cementa

Kvaliteta mineralne sirovine za proizvodnju cementa određena je kemijskim odnosom između CaO , SiO_2 , Al_2O_3 i Fe_2O_3 . Rezerve mineralne sirovine u eksploatacijskom polju "Koromačno" sastoje se od četiri vrste sirovine, tj. litološki članovi su podijeljeni prema kemijskom sastavu i koncentracijama oksida u četiri skupine:

- **visoka sirovina (grašo)** - predstavljena je laporovitim vapnencem do vapnenim laporom (G) sa vrlo visokim sadržajem CaCO_3
- **niska sirovina (magro)** – predstavljena je laporima (M3,2, M1, M, M0), kombinira se s ostalim sirovinama te određuje vijek trajanja eksploatacije
- **silificirani lapor** – lapor s visokim sadržajem SiO_2 (MS), upotrebljiv uz dodatak boksita kao korektiva u kombinaciji s ostalim sirovinama
- **vapnenci** – predstavljeni eocenskim forminiferskim vapnencima (CB) u podini laporovith naslaga i vapnenim brečama (C1, C2, C3) u krovini laporovitih naslaga

Kakvoća mineralne sirovine za proizvodnju cementa eksploatacijskog polja “Koromačno” utvrđena je brojnim ispitivanjima kemijskog sastava uzoraka dobivenih istražnim bušenjem na ispuh i s jezgrovanjem.

PROSJEČNI KEM. SASTAV (%)	NISKA SIROVINA (MAGRO)					VAPNENAC			SIL. LAPOR	VISOKA (GRAŠO)
	MO	AM	M1	M2	M23	C1	C2	C3	MS	G
SiO ₂	23,44	51,36	21,26	18,79	17,03	7,31	2,86	4,58	30,84	10,59
Al ₂ O ₃	6,50	12,33	5,76	4,94	4,67	2,19	0,78	1,30	3,91	2,97
Fe ₂ O ₃	3,10	3,10	2,68	2,33	2,15	1,10	0,48	0,67	1,90	1,41
CaO	33,92	14,22	36,12	38,27	39,80	48,47	52,43	50,78	32,98	45,22
MgO	1,19	1,65	1,37	1,42	1,40	0,85	0,82	0,88	1,01	1,26
SO ₃	0,07	0,20	0,29	0,56	0,33	0,07	0,08	0,08	0,44	0,25
K ₂ O	1,19	1,44	1,22	1,07	0,94	0,42	0,13	0,26	0,68	0,55
Na ₂ O	0,40	1,73	0,29	0,26	0,24	0,10	0,08	0,11	0,20	0,15
TiO ₂	0,33	0,39	0,29	0,26	0,25	0,11	0,04	0,07	0,19	0,15
P ₂ O ₅	0,15	0,26	0,12	0,14	0,15	0,07	0,07	0,08	0,13	0,13
TGŽ	27,92	12,96	29,85	31,59	32,76	38,97	42,04	40,81	26,98	36,86
SM	2,36	3,25	2,43	2,49	2,41	2,15	2,20	2,25	5,14	2,34
AM	2,20	4,10	2,26	2,23	2,29	2,09	1,72	2,06	2,15	2,21
STUP. ZAS.	45,04	8,87	53,07	63,82	72,91	203,91	567,36	343,14	35,77	132,72
PROSTORNA MASA (t/m ³)	2,66					2,71			2,65	2,69

Sirovinsko brašno za proizvodnju cementa dobije se mješavinom navedenih vrsta sirovine. Sastav mješavine određuje se temeljem hidrauličnog, silikatnog i aluminatnog modula te stupnja zasićenja koje moraju biti u okviru određenih vrijednosti.

- **Hidraulični modul** između 2,10 i 2,30.
- **Silikatni modul** između 2,0 i 3,0.
- **Aluminatni modul** između 1,5 i 2,5.
- Idealna vrijednost **stupnja zasićenja** bila bi 100% a u tehnološkom procesu kreće se između 95 i 98%.

Osnovni financijsko-ekonomski pokazatelji eksploatacije cementnih sirovina

U ovom poglavlju daje se primjer izračuna osnovnih financijsko-ekonomskih pokazatelja za jedan kamenolom lapora i vapnenca, korištenih primarno za proizvodnju cementa a sekundarno kao tehničko-građevni kamen, koji proizlazi iz suviška vapnenca za cement.

Predmet analize je postojeći otvoreni površinski kop sirovine za proizvodnju cementa i tehničko-građevnog kamena. Sirovina za proizvodnju cementa koristi se za proizvodnju cementa i ne plasira se direktno na tržište. Trošak proizvodnje cementa predstavlja ulaznu komponentu u strukturi troškova pri proizvodnji cementa. Tehničko-građevni kamen (vapnenac) dijelom se koristi kao sirovina za proizvodnju cementa a tek se suvišak plasira na tržište. Površinski kop u sirovini za cement potpuno je otvoren i pripremljen za eksploataciju. Tijekom eksploatacije nisu potrebna dodatna ulaganja u rudarske prostorije za pripremu otkopavanja. Tijekom otkopavanja tehničko-građevnog kamena potrebno je uložiti sredstva u radove otvaranja etaža i izradu transportnih puteva do etažnih ravnina.

Prema projektu, eksploatacijske rezerve polja Koromačno iznose 21 861 459 m³ sirovine. Od toga 16 522 690 m³ čine cementne sirovine a 5 338 769 m³ tehničko-građevni kamen. Projektirana je ravnomjerna godišnja proizvodnja od 357 520 m³ u sraslom stanju. Od toga 300 000 m³ cementne sirovine, i to 270 000 m³ lapora te 30 000 m³ vapnenca. Preostalih 57 520 m³ čini vapnenac, čija je eksploatacija vezana za cementnu sirovinu ali predstavlja višak, i stoga se plasira kao tehničko-građevni kamen. Prema ovakvoj godišnjoj proizvodnji, eksploatacijske rezerve dovoljne su za više od 60 godina proizvodnje.

Troškovi ulaganja

Troškovi ulaganja tijekom trajanja eksploatacije na površinskom kopu “Koromačno” specificiraju se na slijedeće stavke:

- zamjena rudarske mehanizacije,
- rekonstrukcija drobilišnog postrojenja,
- istraživanje, dopuna i obnova eksploatacijskih rezervi
- otkup zemljišta unutra prostora izvođenja rudarskih radova
- izrada tehničke dokumentacije i ažuriranje geodetske podloge

Razrada i iznos troškova prikazani su u Tabela 10.

Ukupna ulaganja tijekom eksploatacije iznose $U=248\,310\,000,00$ kuna, od čega se 54,2 % odnosi na nabavu rudarske mehanizacije, 27,4 % na drobilišno postrojenje, 1,0 % na istražne radove, 0,5 % na izradu tehničke dokumentaciji i 16,9 % na rješavanje imovinsko-pravnih odnosa.

Nositelj rudarske koncesije osigurati će financijska sredstva za ulaganja iz vlastitih prihoda.

Tabela 10 Struktura troškova ulaganja

Vrsta ulaganja	Iznos, Kn	
Rudarska mehanizacija		
buldozer, 1 kom	3 300 000,00 ×6	Obzirom na projektiranu godišnju proizvodnju, predviđa se svakih 10 godina obnoviti rudarsku mehanizaciju.
bušaća garnitura, 1kom	2 550 000,00 ×6	
utovarač, 1 kom	2 770 000,00 ×6	
bager gusjeničar, 1 kom	3 650 000,00 ×6	
damperi, 3 komada	9 480 000,00 ×6	
dostavna i pomoćna vozila, 3 kom	700 000,00 ×6	
Σ	134 700 000,00	
Drobilišno postrojenje		
rekonstrukcija drobilishnog	3 650 000, 00 ×3	Obzirom na projektiranu godišnju proizvodnju, procjenjuje se da je svakih 20 godina potrebno izvesti rekonstrukciju drobilishnog postrojenja. Osim toga potrebno je uložiti sredstva u investicijska ulaganja (zamjena rotora drobilice svake 2 god., obloga i ploča svake 3 god., zamjena čekića jednom godišnje) i godišnji remont.
investicijsko održavanje:		
zamjena rotora drobilice	730 000,00 ×32	
zamjena obloga i ploča	730 000,00 ×21	
zamjena čekića	150 000,00 ×61	
godišnji remont	9 200 000,00	
Σ	67 990 000,00	
Istraživanje, dopuna i obnova eksploatacijskih rezervi		
obnova rezervi	520 000, 00	Postojeće rezerve dovoljne su za preko 60 godina eksploatacije. Zakonski, u nove istražne radove, potrebno je ulagati tek nakon 40 godina. Svakih pet godina potrebno je provesti postupak obnove rezervi. U cilju prevođenja izvanbilančnih rezervi u bilančne (ispod kote 0 m) potrebno je provesti dodatne istražne radove.
istražna bušenja na jezgru i analize	1 000,00 ×1300m'	
geotehnička i hidrogeološka	450 000,00	
izrada dokumentacije	150 000, 00	
Σ	2 420 000,00	
Otkup zemljišta		
	75,00 ×560000m ²	Eksploatacija se odvija na površini otprilike 56 ha, za koje je potrebno riješiti imovinsko-pravne odnose
Σ	42 000 000,00	
Izrada tehničke dokumentacije i ažuriranje geodetske podloge		
izrada tehničke dokumentacije	250 000,00	
ažuriranje geodetske podloge i	800 000,00	
izvedbeni projekt rekultivacije	150 000,00	
Σ	1 200 000,00	
Ukupno:	248 310 000,00	

Jedinični troškovi ulaganja (po toni sirovine) iznose 4,27 kn/t:

$$T_u = \frac{U}{(G_c + G_{th}) \cdot \rho} = \frac{248\,504\,000}{(16\,522\,690 + 5\,338\,769) \cdot 2,66} = 4,27 \text{ kn/t}$$

gdje je: G_c - eksploatacijske rezerve cementnih sirovina
 G_{th} - eksploatacijske rezerve tehničko-građevnog kamena
 U - ukupni troškovi ulaganja
 ρ - gustoća u sraslom stanju

Troškovi eksploatacije

Priprema za otkopavanje, otvaranje novih etaža i izrada transportnih putova te radovi rekultivacije direktno terete troškove eksploatacije mineralne sirovine. Također su uključeni materijalni troškovi i dio plaća za režiju.

Očekivani troškovi eksploatacije, svake godine predviđenog životnog vijeka projekta, prikazani su u Tabela 11.

Tabela 11 Troškovi eksploatacije

Specifikacija eksploatacijskih troškova, kn/t	
bušenje i miniranje	4,00
utovar	2,20
prijevoz	4,90
drobljenje	3,20
troškovi rekultivacije	0,80
troškovi režije (zaposleni)	1,50
troškovi održavanja puteva	0,30
troškovi održavanja separacije	0,60
troškovi održavanja strojeva	0,50
naknada za eksploataciju	0,15
Σ	18,15

Ukupni godišnji eksploatacijski troškovi iznose 17 260 704,45 kn:

$$T_{e, god} = Q \cdot \rho \cdot T_e = 357\,520 \cdot 2,66 \cdot 18,15 = 17\,260\,704,45 \text{ kn}$$

gdje je: Q – projektirani godišnji kapacitet, u sraslom stanju
 T_e – jedinični eksploatacijski troškovi

Godišnji ukupni prihod

Godišnji ukupni prihod (GUP) potječe većim dijelom od prihoda proizvodnje cementa i manjim dijelom od prihoda tehničko-građevnog kamena. Udjel troškova mineralne sirovine za proizvodnju cementa (18,15 kn/toni) u ukupnim troškovima proizvodnje cementa iznosi 8,04% (prema podacima Holcima d.o.o. Hrvatska). Ukupni troškovi proizvodnje cementa iznose 225,5 kuna/toni (računajući i amortizaciju). Prosječna prodajna cijena tone cementa iznosi 520 kuna/toni.

$$GUP = P_c + P_{th} = 33\,448\,000 + 3\,857\,589 = 37\,305\,589,00 \text{ kn}$$

$$P_c = G_c \cdot c_{ps} = 800\,000 \cdot 41,81 = 33\,448\,000,00 \text{ kn}$$

$$c_{ps} = CP_c \cdot UT_{ms} = 520 \cdot 0,0804 = 41,81 \text{ kn/t}$$

$$P_{th} = G_{th} \cdot CP_{th} = 151\,278 \cdot 25,5 = 3\,857\,589,00 \text{ kn}$$

gdje je:

- P_c - dio ukupnog prihoda ostvaren prodajom cementa koji pripada sirovini
- G_c - projektirana godišnja proizvodnja sirovine za proizvodnju cementa
- c_{ps} - udio mineralne sirovine u prodajnoj cijeni cementa
- UT_{ms} - udio troškova mineralne sirovine u proizvodnji cementa (8,04%)
- P_{th} - dio ukupnog prihoda ostvaren prodajom tehničko-građevnog kamena
- G_{th} - projektirana godišnja proizvodnja tehničko-građevnog kamena
- CP_{th} - prodajna cijena tehničko-građevnog kamena (25,5 kn)

Bruto dobit i porez na dobit

Jed. trošk. ulag. T_u , kn/t	Jed. trošk. ekspl., T_e , kn/t	ukupni jed.trošk. $T=T_u+T_e$, kn/toni	ukupni prihod, GUP, kuna	ukupni troškovi, $T \cdot G$, kuna	Brutto dobit, (4-5) kuna	porez, 20%, kuna	netto dobit, (6-7) kuna
1	2	3	4	5	6	7	8
4,27	18,15	22,42	37 305 589	17 260 704	20 044 885	4 008 977	16 035 908

Ocjena isplativosti ulaganja

Godišnja netto dobit iznosi 16 035 908 kuna. Ukupna netto dobit tijekom 61 godine trajanja projekta iznosi 978 190 388 kuna. Ukupna ulaganja tijekom trajanja projekta iznose 248 310 000. kuna. U početku izvođenja projekta nema većih ulaganja, obzirom na činjenicu da je otkup zemljišta proveden, izvedena su istraživanja i utvrđene rezerve mineralnih sirovina a kop je potpuno otvoren i spreman za ostvarivanje projektirane proizvodnje. Veće ulaganje u rudarsku mehanizaciju nastupa tek za 10 godina (22 450 000. kuna). Budući se zamjena strojeva može rasporediti unutar nekoliko godina (ili se strojevi nabave na otplatu), vidljivo je da se ulaganja mogu pokriti iz vlastitog prihoda.