

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*

*Jamova 2, p. 3422  
1115 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si*



**VISOKOŠOLSKI  
STROKOVNI ŠTUDIJ  
GRADBENIŠTVA  
SMER OPERATIVNO  
GRADBENIŠTVO**

Kandidat:

**MITJA MLAKAR**

**Procesi propadanja armiranega betona  
v objektih jedrskih elektrarn**

Diplomska naloga št.: **442\SOG**

**Deterioration processes of reinforced concrete  
in nuclear power plants**

Graduation thesis No.: **442\SOG**

**Mentor:**  
izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

**Predsednik komisije:**  
doc.dr. Tomo Cerovšek

Ljubljana, 2011

## **IZJAVE**

Podpisani Mitja Mlakar izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom: »Procesi propadanja armiranega betona v objektih jedrskih elektrarn«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 14.11.2011

Mitja Mlakar



## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

**UDK:** 621.039.5:691.32(043.2)  
**Avtor:** Mitja Mlakar  
**Mentor:** izr. prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov  
**Naslov:** Procesi propadanja armiranega betona v objektih jedrskih elektrarn.  
**Obseg in oprema:** 82 str., 13 pregl., 53 sl.  
**Ključne besede:** Jedrski reaktorji, beton, propadanje armiranega betona

### **Izvodček**

Cilj diplomske naloge je prikazati vplive okolja, ki lahko poslabšajo trajnost armiranobetonskih zgradb v jedrskih elektrarnah. V prvem delu naloge so predstavljene vrste jedrskih reaktorjev in sistem delovanja tlačnovodnega reaktorja v jedrski elektrarni Krško. Sledi poglavje, v katerem so predstavljene sestavine betona in njihov vpliv na lastnosti svežega in strjenega betona. V nadaljevanju je predstavljena zgradba in funkcija armiranobetonskega zadrževalnega hrama ter stopnje izpostavljenosti armiranobetonskih konstrukcij, v skladu z določili standardov SIST EN 206-1 in SIST 1026. V zadnjem poglavju so podrobneje predstavljeni procesi, zaradi katerih lahko prihaja do poškodb in propadanja armiranobetonskega zadrževalnega hrama jedrske elektrarne, in načini, kako te procese preprečiti ali vsaj zmanjšati njihov vpliv.



## **BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

**UDC:** 621.039.5:691.32(043.2)  
**Author:** Mitja Mlakar  
**Supervisor:** Assoc. Prof. Violeta Bokan Bosiljkov, Ph. D.  
**Title:** Deterioration processes of reinforced concrete in nuclear power plants.  
**Notes:** 82 p., 13 tab., 53 fig.  
**Key words:** Nuclear reactors, concrete, deterioration of reinforced concrete

### **Abstract**

The diploma thesis aims to present impact of environment on the premature deterioration of reinforced concrete structures in nuclear power plants. The first section presents the types of nuclear reactors in general and pressurized water reactor system operating in a nuclear power plant Krško. The second part presents the components of concrete and their influence on the properties of fresh and hardened concrete. In the continuation of the thesis structure and function of the reinforced concrete containment building is presented, as well as exposure classes for reinforced concrete structures, proposed by the Slovenian standards for concrete SIST EN 206-1 and SIST 1026. The last chapter presents the processes that lead to damage and deterioration of reinforced concrete containment of nuclear power plant, and ways how to prevent or at least reduce their impact.



## **ZAHVALA**

Za pomoč in nasvete pri pisanju diplomske naloge se zahvaljujem mentorici izr. prof. dr. Violeti Bokan Bosiljkov.

Iskreno se zahvaljujem tudi Tini, ki mi je skozi vsa leta študija stala ob strani, me spodbujala in mi pomagala.





## KAZALO VSEBINE

<b>1</b>	<b>UVOD</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>JEDRSKI REAKTORJI</b>	<b>2</b>
2.1	Tipi jedrskih reaktorjev	2
2.1.1	Tlačnovodni reaktor	3
2.1.2	Vrelni reaktor	4
2.1.3	Tlačnovodni težkovodni reaktor	5
2.1.4	Plinski reaktor	5
2.1.5	Vodno hlajeni grafitni reaktor	6
2.2	Sistemi in delovanje tlačnovodnega reaktorja v NEK	7
2.2.1	Primarni krog	7
2.2.2	Sekundarni krog	8
2.2.3	Terciarni krog	9
<b>3</b>	<b>SESTAVINE BETONA IN NJIHOV VPLIV NA LASTNOSTI BETONA</b>	<b>11</b>
3.1	Cement	12
3.1.1	Vpliv cementa na lastnosti betona	14
3.2	Agregat	18
3.2.1	Vpliv agregata na lastnosti betona	20
3.3	Reaktivni mineralni dodatki	23
3.3.1	Granulirana plavžna žindra	25
3.3.2	Elektrofiltrski pepel	26
3.3.3	Mikrosilika	27
3.4	Voda	27
3.5	Kemijski dodatki	28
<b>4</b>	<b>ZASNOVA BETONSKEGA ZADRŽEVALNEGA HRAMA</b>	<b>30</b>
4.1	Betonski del	35
4.2	Navadno armaturno jeklo	36
4.3	Jeklo za prednapenjanje	36
4.4	Linijska jeklena plošča	38
<b>5</b>	<b>IZPOSTAVLJENOST ARMIRANOBETONSKIH KONSTRUKCIJ AGRESIVNIM VPLIVOM</b>	<b>39</b>
5.1	Stopnje izpostavljenosti glede na delovanje okolja	41
5.2	Stopnje agresivnosti okolja	47
5.3	Priporočene stopnje izpostavljenosti za pomembnejše betonske konstrukcijske elemente z armaturo ali vgrajenimi kovinskimi deli	49
<b>6</b>	<b>PROCESI PROPADANJA ARMIRANEGA BETONA</b>	<b>53</b>

6.1	Procesi propadanja betona	53
6.1.1	Fizikalni procesi	53
6.1.2	Kemični procesi	64
6.1.3	Biološki procesi	72
6.2	Mehanizmi propadanja armaturnega jekla ter jekla za prednapenjanje	73
6.2.1	Korozija jekla	73
6.2.2	Vpliv temperature izpostavljenosti	76
6.2.3	Napetostna korozija in vodikova krhkost zelo trdne armature v prednapetih konstrukcijah	77
6.2.4	Blodeči istosmerni tokovi	77
<b>7</b>	<b>SKLEP</b>	<b>79</b>
	<b>VIRI</b>	<b>81</b>

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Klinkerski minerali v portland cementu in njihove lastnosti	13
Preglednica 2: Kemijska sestava čistega portland cementa	14
Preglednica 3: Razvrščanje cementov glede na glavne sestavine in dovoljen delež mineralnih dodatkov po standardu SIST EN 197-1	24
Preglednica 4: Kemijska sestava granulirane plavžne žindre	26
Preglednica 5: Kemijska sestava elektrofiltrskega pepela	27
Preglednica 6: Odnos med mehanskimi lastnostmi in dimenzijami posameznih delov	32
Preglednica 7: Razredi in stopnje izpostavljenosti betona	41
Preglednica 8: Mejne vrednosti kemičnega delovanja zemljin in talne vode	47
Preglednica 9: Zahtevane posebne lastnosti strjenega betona in priporočene vrednosti parametrov sestave svežega betona za posamezne stopnje izpostavljenosti	47
Preglednica 10: Priporočene stopnje izpostavljenosti	49
Preglednica 11: Prikaz in opis razpok zaradi reoloških lastnosti betona	54
Preglednica 12: Prikaz in opis razpok zaradi mehanskih obremenitev	54
Preglednica 13: Mejne vrednosti velikosti upogibnih razpok za konstrukcijske elemente	57



## KAZALO SLIK

Slika 1: Jedrski reaktorji v Evropi.....	2
Slika 2: Vrste jedrskih elektrarn po svetu.....	3
Slika 3: Shematski prikaz tlačnovodnega reaktorja.....	4
Slika 4: Shematski prikaz vrelnega reaktorja.....	5
Slika 5: Shematski prikaz tlačnovodnega težkovodnega reaktorja.....	5
Slika 6: Shematski prikaz plinskega reaktorja.....	6
Slika 7: Shematski prikaz vodno hlajenega grafitnega reaktorja.....	6
Slika 8: Shematski prikaz primarnega kroga.....	8
Slika 9: Shematski prikaz sekundarnega kroga.....	9
Slika 10: Shematski prikaz terciarnega kroga.....	10
Slika 11: Osnovne sestavine betona.....	11
Slika 12: Časovni potek vezanja (levo) in strjevanja (desno) cementne paste.....	16
Slika 13: Razvoj hidratacijske toplote v prvih urah vezanja cementa.....	16
Slika 14: Pridobivanje tehničnega kamna v kamnolomu.....	18
Slika 15: Drobljenje in sortiranje drobljenega agregata po različnih frakcijah.....	19
Slika 16: Sejani gramoz kot agregat za beton.....	19
Slika 17: Varnostne pregrade.....	30
Slika 18: Teoretično najhujša možna nesreča.....	31
Slika 19: Shematični prikaz PWR zadrževalnega hrama.....	33
Slika 20: Prerez prednapete betonske stene PWR zadrževalnega hrama.....	34
Slika 21: Prerez armirano betonske stene PWR zadrževalnega hrama.....	35
Slika 22: Princip delovanja armiranega betona.....	36
Slika 23: Žice za prednapenjanje.....	37
Slika 24: Pletene žice za prednapenjanje.....	37
Slika 25: Palice za prednapenjanje.....	37
Slika 26: Čepi Nelson za sidranje pločevine v beton.....	38
Slika 27: Vpliv korozije zaradi karbonatizacije.....	39
Slika 28: Vpliv korozije zaradi kloridov, ki ne izvirajo iz morske vode.....	40
Slika 29: Vpliv korozije zaradi kloridov iz morske vode.....	40
Slika 30: Vpliv zmrzovanja/tajanja s sredstvi za tajanje ali brez njih.....	40
Slika 31: Primeri različnih možnih razpok v hipotetični konstrukciji.....	56

Slika 32: Poškodba betonske plošče zaradi kristalizacije soli. ....	58
Slika 33: Tipi poškodb zaradi zmrzovanja in tajanja.....	59
Slika 34: Shematski prikaz izločevanja vode v namerno vnesene zračne mehurčke.....	59
Slika 35: Abrazija – erozija betona. ....	60
Slika 36: Vpliv temperature na preostalo tlačno trdnost betona. ....	62
Slika 37. Vpliv nevtronskega sevanja na tlačno trdnost betona in modul elastičnosti. ....	63
Slika 38: Primer razpokanja stavbe zaradi diferencialnih posedkov. ....	64
Slika 39: Konceptualni model izluževanja na prosti površini betona. ....	64
Slika 40: Konceptualni model izluževanja zaradi homogenega pronicanja vode skozi beton .....	64
Slika 41: Površinske poškodbe zaradi napada kislin: (a)mehanizem, (b)primer kislinskega napada na betonsko steno.....	66
Slika 42: Sulfatni napad na beton. Entrigrit (puščice) je nadomestil del C-S-H faze v cementnem kamnu .....	67
Slika 43: Razpoke v betonu zaradi sulfatnega napada: (a)mehanizem, (b)primer konkretnih razpok zaradi sulfatnega napada. ....	68
Slika 44: Taumazit okoli grobih zrn agregata in v razpokah. ....	69
Slika 45: Razpoke v betonu zaradi zapoznelega oblikovanja etringita.....	70
Slika 46: Razpokanje betona zaradi ASR:(a)mehanizem (b)prikaz gela, ki povzroča širjenje razpok (c)poliran del betona prikazuje razpoke, ki jih povzroča širjenje agregata.....	71
Slika 47: Poškodba objekta zaradi ASR .....	71
Slika 48: Biodegradacija: (a)alge na zunanji strani hiše (b)poškodba betona zaradi žveplene kisline v kanalizaciji (c)razpadajoča betonska tla v poplavljeni kleti.....	73
Slika 49: Shematični prikaz korozije v betonu. ....	74
Slika 50: Prostornina različnih oblik Fe- oksidov in hidroksidov. ....	75
Slika 51: Vrste poškodb betona zaradi korozije jekla.....	75
Slika 52: Korozija armiranega betona: (a) objekt v stiku z morskovo vodo, (b)poškodba AB mostu.....	76
Slika 53: Prikaz enakomerne in jamičaste korozije. ....	76

## 1 UVOD

V svetu so jedrske elektrarne zelo razširjene, saj obratuje preko 400 energetskih jedrskih reaktorjev, ki proizvedejo 16% svetovnih potreb po električni energiji. Glede na vlogo, ki jo ima jedrska energija v svetu in pri nas je misel o zaprtju oz. opustitvi virov jedrske energije nemogoča. Tudi zato, ker so prizadevanja za zmanjšanje vplivov na okolje vse večja.

Pri izgradnji jedrskih objektov je potrebno posvetiti veliko pozornosti prav izolaciji delov, ki sevajo radioaktivne snovi, od človeškega, živalskega in rastlinskega okolja. Takšne izolacije se izdelajo z inženirskimi pregradami, v katerih ima pomembno mesto prav beton, saj poleg fizikalne izolacije omogoča tudi kemijsko izolacijo, zaradi visokega pH porne vode.

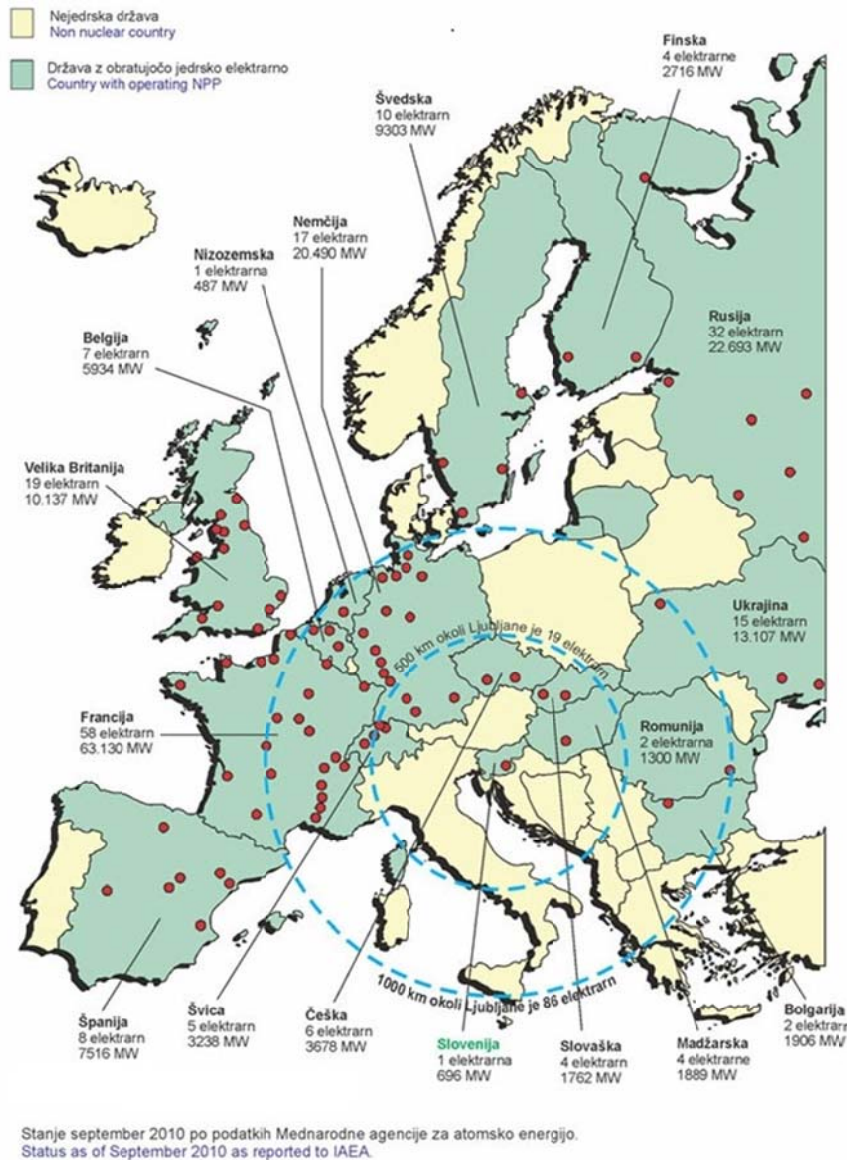
Cilj diplomske naloge je prikazati vplive okolja, ki lahko poslabšajo trajnost betonskih zgradb v jedrskih elektrarnah. Ko se beton stara, se spreminjajo tudi njegove lastnosti, ki so posledica dolgotrajnih mikrostrukturnih sprememb (počasna hidracija, kristalizacija amorfnih sestavin in reakcije med cementnim kamnom in agregati), kot tudi vplivov okolja. Te spremembe niso škodljive, dokler beton izpolnjuje zahteve glede učinkovitosti. Beton lahko utрпи nezaželjene spremembe s časom, zaradi sprememb v cementnem kamnu (matrici) in/ali fizikalnih ali kemijskih sprememb agregata.

V diplomski nalogi bodo najprej predstavljene vrste jedrskih reaktorjev in njihovo delovanje. V nadaljevanju bodo opisane sestavine betona in njihov vpliv na lastnosti betona. Predstavljena bo sestava betonskega zadrževalnega hrama in funkcija, ki jo opravlja v času delovanja jedrske elektrarne. Na kratko bo predstavljena izpostavljenost armiranobetonskih konstrukcij stopnjam agresivnih vplivov, kot jih obravnava slovenski standard za beton SIST EN 206-1. Na koncu bodo predstavljeni najpogostejši procesi propadanja armiranobetonskih konstrukcij v jedrskih elektrarnah.



## 2 JEDRSKI REAKTORJI

Jedrska energija je v Evropi dobro razvita, saj jo izkorišča večina držav v Evropi, kot je razvidno iz spodnje slike (slika 1).



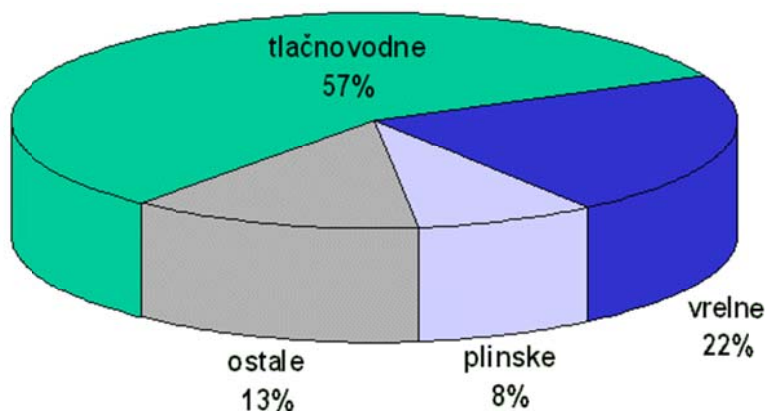
Slika 1: Jedrski reaktorji v Evropi.

Vir: <http://www.icjt.org>

### 2.1 Tipi jedrskih reaktorjev

Poznamo različne tipe jedrskih reaktorjev in jih razlikujemo glede na vrsto goriva, hladila in moderatorja. Najpogostejši tipi jedrskih reaktorjev so tlačnovodni, kar je razvidno iz slike 2.

Poznamo še vrelnе, plinske in ostale reaktorje, ki so predstavljeni v nadaljevanju diplomske naloge.



**Slika 2: Vrste jedrskih elektrarn po svetu.**

Vir: <http://www.icjt.org>

Glede pridobivanja pare ločimo PWR (tlačnovodni reaktor) in BWR (vrelni reaktor) reaktorje.

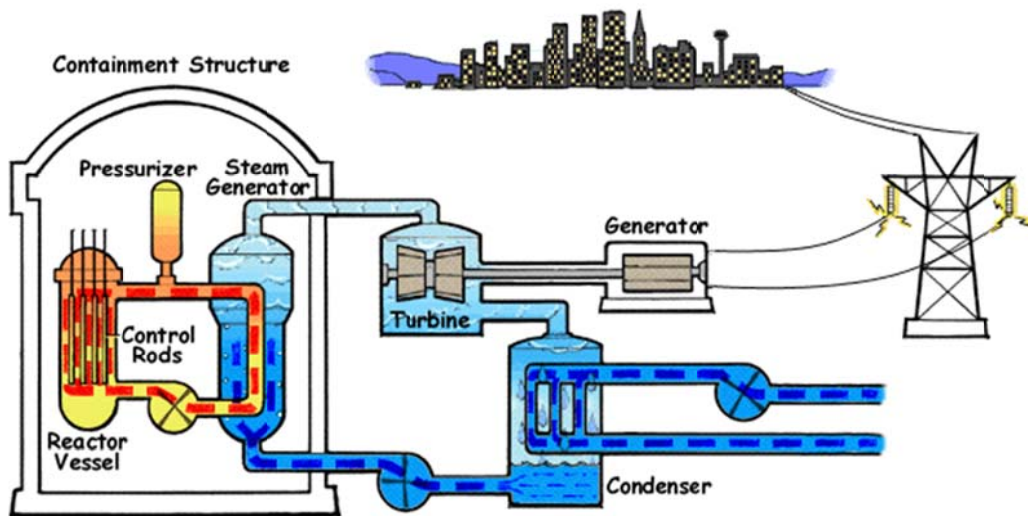
Največ reaktorjev je seveda PWR, ki kot moderator uporabljajo lahko (navadno) vodo, zato jim tudi rečemo LWR (lahkovodni reaktorji) ali težko vodo, te poimenujemo PHWR (tlačnotežkovodni reaktorji).

### 2.1.1 Tlačnovodni reaktor

(PWR: Pressurized Water Reactor)

Tlačnovodni reaktor je najbolj razširjen tip reaktorja. Tlačnovodni reaktor uporablja več kot polovica obratujočih jedrskih elektrarn. Gorivo, ki ga uporabljajo je obogateni uran. Hladilna voda (primarni hladilni krog) se v reaktorski posodi nahaja pod tlakom, ki je večji od nasičenega parnega tlaka pri največji obratovalni temperaturi. Zato se reaktorsko hladilo ne more upariti v reaktorski posodi. Do uparjanja pride šele v uparjalniku (sekundarni hladilni krog), ki opravlja vlogo izmenjalnika toplote, kjer je veliko število tankih cevi, preko katerih se izmenjuje toplota primarnega in sekundarnega kroga. Močne primarne črpalke poganjajo skozi reaktorsko hladilo, ki svojo toploto oddaja sekundarnemu hladilu, ki kroži okoli cevi uparjalnika. Zaradi segrevanja se sekundarno hladilo uparja. Para poganja turbino, po koncu dela pa se kondenzira v kondenzatorju in se nato vrača v uparjalnik. Pri tlačnovodnem reaktorju sta primarni in sekundarni hladilni krog ločena. Takšen tip reaktorja uporablja tudi NEK (Nuklearna elektrarna Krško).

Tudi reaktor NEK je tlačnovodni reaktor.



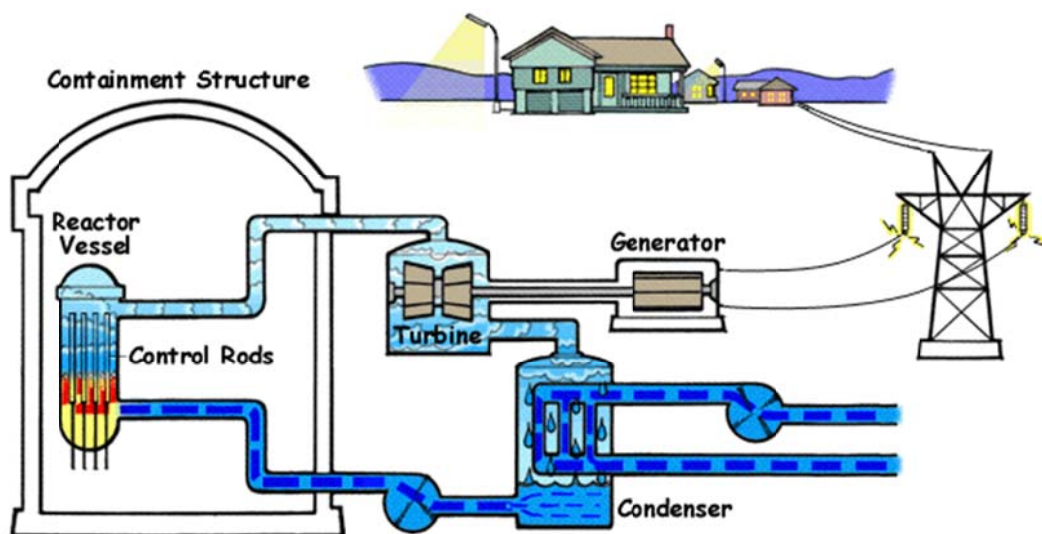
Slika 3: Shematski prikaz tlačnovodnega reaktorja.

Vir: <http://en.wikipedia.org>

### 2.1.2 Vrelni reaktor

(BWR: Boiling Water Reactor)

Več kot 20% vseh obratujočih jedrskih elektrarn uporablja vrelni reaktor. Gorivo je obogateni uran. V reaktorski posodi vrelnega reaktorja je manjši tlak kot v visokotlačnih reaktorjih. Zanje je značilno, da se voda uparja v reaktorju in nato para poganja turbino, kjer se po opravljenem delu kondenzira in se vrne nazaj v reaktorsko posodo. Ker vrelni reaktor nima uparjalnikov, je v primerjavi s tlačnovodnim enostavnejše gradnje.



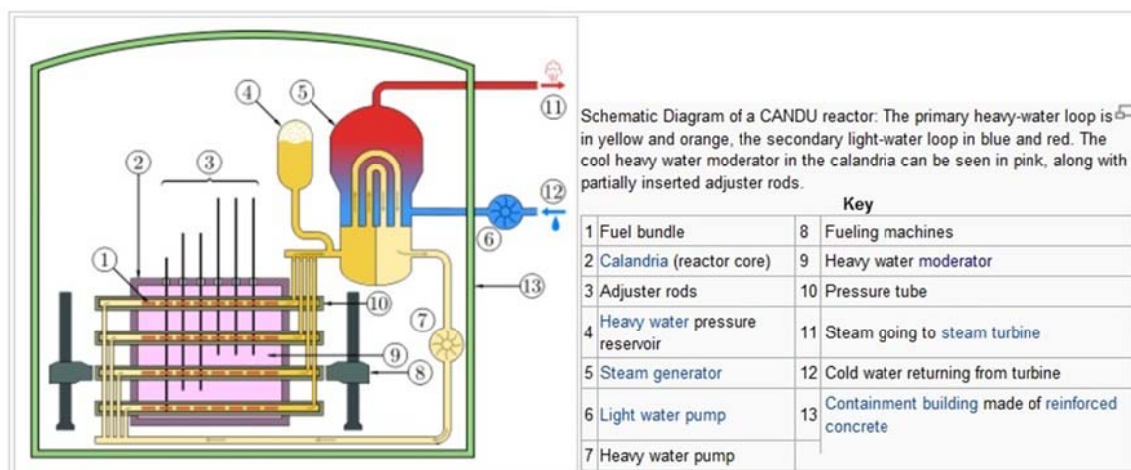
Slika 4: Shematski prikaz vrelnega reaktorja.

Vir: <http://en.wikipedia.org>

### 2.1.3 Tlačnovodni težkovodni reaktor

(PHWR - Pressurized Heavy Water Reactor) ali CANDU reaktor

Težkovodni reaktorji so tako moderirani, kot tudi hlajeni s težko vodo. Težka voda je boljši moderator od lahke vode, vendar je ta način hlajenja dražji. Omogoča uporabo neobogatene urana. Voda v reaktorju ne vre, v uparjalniku pa se uparja sekundarna voda.



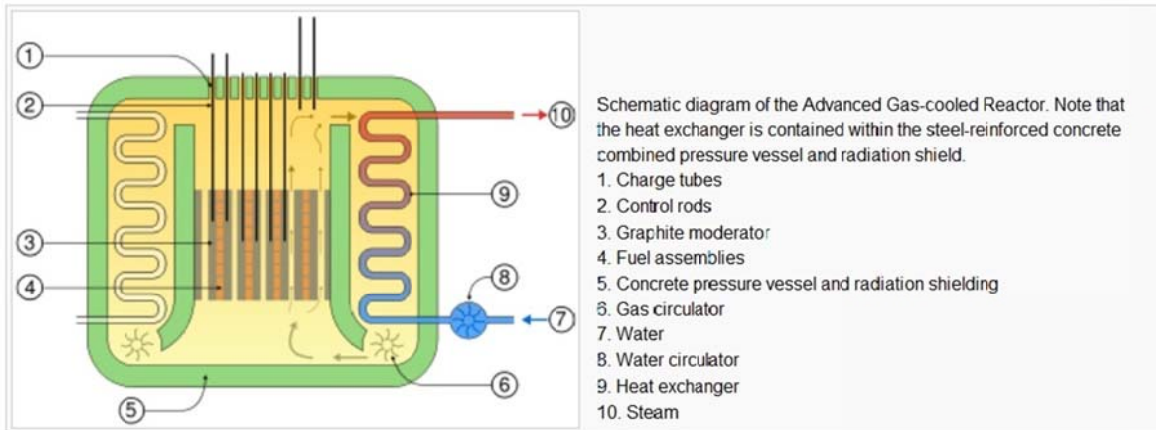
Slika 5: Shematski prikaz tlačnovodnega težkovodnega reaktorja.

Vir: <http://en.wikipedia.org>

### 2.1.4 Plinski reaktor

(GCR - Gas Cooled Reactor, AGR - Advanced Gas Cooled Reactor)

Plinski reaktorji so moderirani z grafitom in hlajeni s plinom CO<sub>2</sub>. Plin segreva vodo, ki se uparja in poganja turbino. Kot gorivo uporabljajo naravni uran v obliki kovine.



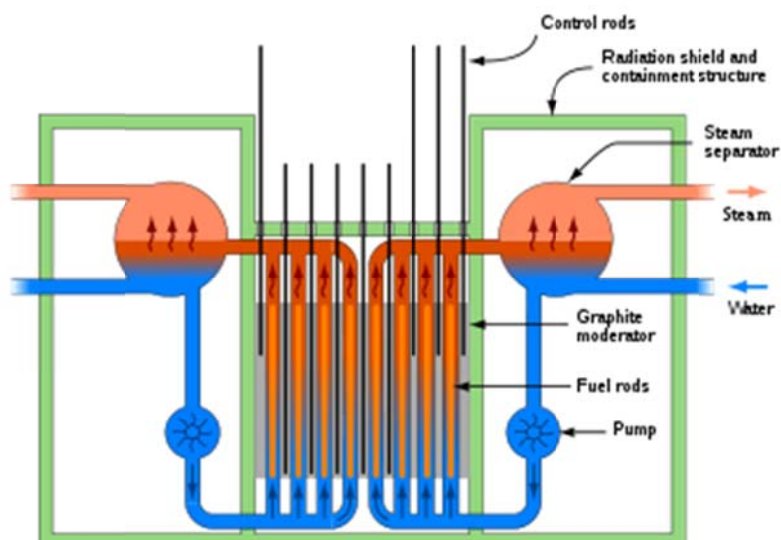
Slika 6: Shematski prikaz plinskega reaktorja.

Vir: <http://en.wikipedia.org>

### 2.1.5 Vodno hlajeni grafitni reaktor

(LWGR - Light Water Cooled Graphite Reactor)

Plinski reaktor je moderiran z grafitom in hlajen z navadno vodo. Voda vre v reaktorju, para se loči od kapljavine v ločevalniku pare. Gorivo je obogateni uran. Take vrste je bila elektrarna v Černobilu.



Slika 7: Shematski prikaz vodno hlajenega grafitnega reaktorja.

Vir: <http://en.wikipedia.org>

## **2.2 Sistemi in delovanje tlačnovodnega reaktorja v NEK**

Tehnološki del jedrske elektrarne Krško je razdeljen v tri osnovne termodinamične sklope sistemov:

- primarni sistemi,
- sekundarni sistemi,
- terciarni sistemi.

Ker v vseh treh sklopih sistemov, ki so med seboj ločeni, kroži voda, jih lahko zaradi lažjega razumevanja poimenujemo tudi krogi. Prva dva kroga sta sklenjena, tretji pa je, ker za ohlajanje pare uporabljajo savsko vodo, povezan z okoljem.

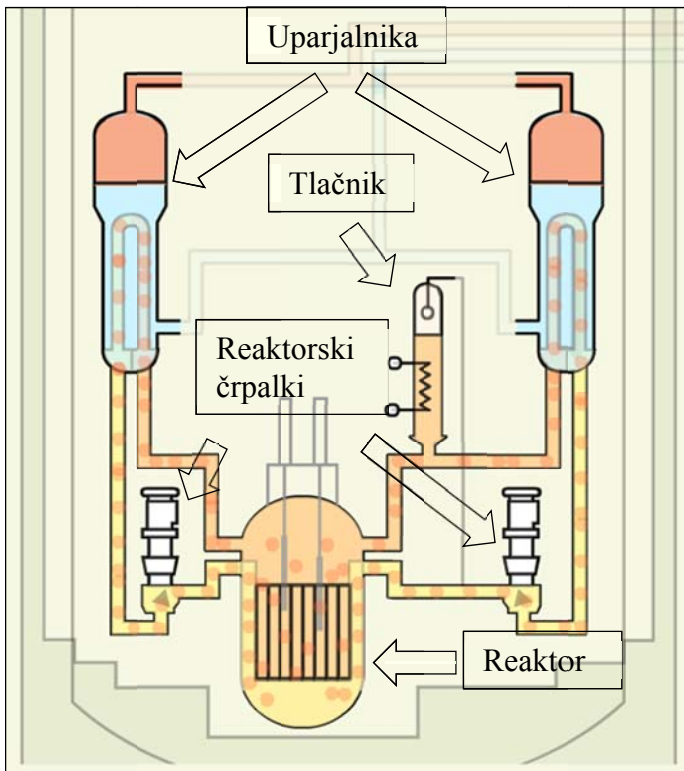
### **2.2.1 Primarni krog**

Primarni krog sestavljajo: reaktor, uparjalnika, reaktorski črpalki, tlačnik in cevovodi.

Toplota, ki se sprošča v sredici reaktorja, segreva vodo, ki kroži v primarnem krogu. Toplota vode se preko sten cevi v uparjalnikih prenese na vodo sekundarnega kroga.

Kroženje vode v primarnem krogu omogočata reaktorski črpalki. Tlačnik vzdržuje tlak v primarnem krogu in preprečuje vrenje vode v sredici.

Vse komponente primarnega kroga so nameščene v zadrževalnem hramu, ki ima nalogo, da tudi v primeru nezgode izolira primarni sistem od okolja.



**Slika 8: Shematski prikaz primarnega kroga.**

Vir: <http://www.nek.si>

### 2.2.2 Sekundarni krog

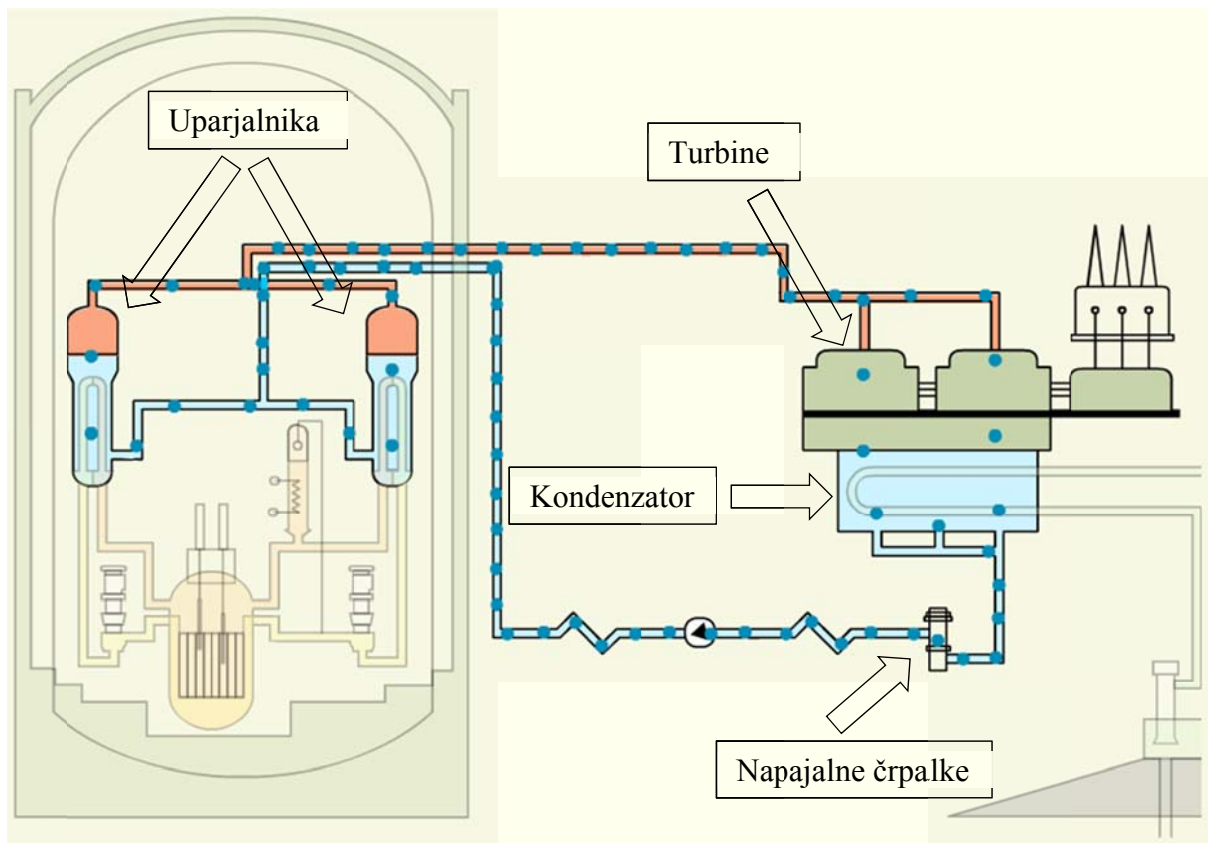
Sekundarni krog sestavljajo: uparjalnika, turbine, generator, kondenzator, napajalne črpalke in cevovodi.

Uparjalnika sta v bistvu parna kotla, v katerih iz vode sekundarnega kroga nastaja para, ki odteka v turbino. V turbini se energija pare pretvarja v mehansko energijo.

To energijo generator pretvori v električno energijo in jo preko transformatorjev oddaja v elektroenergetsko omrežje.

Izrabljena para iz turbine odteka v kondenzator, kjer se v stiku s hladnimi cevmi kondenzatorja spremeni v vodo.

Napajalne črpalke potiskajo vodo iz kondenzatorja nazaj v uparjalnik, kjer ponovno nastaja para.



**Slika 9: Shematski prikaz sekundarnega kroga.**

Vir: <http://www.nek.si>

### 2.2.3 Terciarni krog

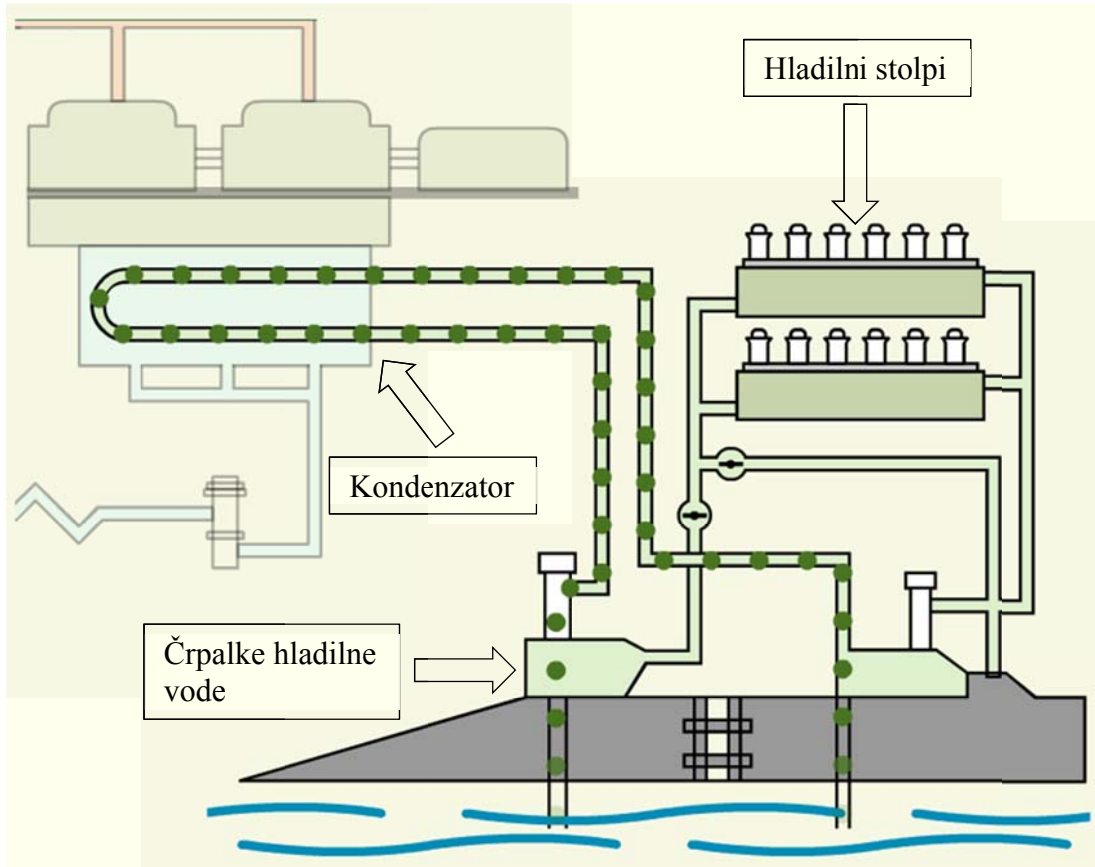
Terciarni krog sestavljajo: kondenzator, hladilne črpalke, hladilna stolpa in cevovodi.

Terciarni krog je namenjen odvajanju toplote, ki je ni mogoče koristno izrabiti za proizvodnjo električne energije in je potreben za hlajenje kondenzatorja.

Hladilne črpalke potiskajo savsko vodo v kondenzator ter vračajo v Savo. Pri pretoku skozi kondenzator se savska voda segreje, ker sprejme toploto izrabljene pare.

Ker segrevanje savske vode lahko vpliva na biološke lastnosti reke Save, upravne omejitve določajo dovoljen prirastek temperature in delež odvzetega pretoka. V primeru neugodnih vremenskih razmer se uporabljajo hladilni stolpi. V izjemno neugodnih vremenskih razmerah je treba znižati moč elektrarne.





Slika 10: Shematski prikaz terciarnega kroga.

Vir: <http://www.nek.si>

### 3 SESTAVINE BETONA IN NJIHOV VPLIV NA LASTNOSTI BETONA

Beton je mešanica cementa (vezivo), grobega agregata, drobnega agregata, vode in v določenih primerih tudi kemijskih in/ali mineralnih dodatkov. Betonska struktura pa vsebuje tudi določeno število odprtih in zaprtih zračnih por.



**Slika 11: Osnovne sestavine betona.**

Vir: D.J. Naus, 2007

Mešanica svežega cementa in vode postane cementna pasta, ki zaradi kemijske reakcije med minerali portland cementnega klinkerja in vodo, ki jo imenujemo hitratcija cementa prične vezati, pozneje pa še strjevati in se preoblikuje v cementni kamen. Strevanje cementnega kamna je lahko dolgotrajen proces, ki traja tudi več let, če je v strukturi betona na voljo nehidratizirani cement in voda.

V povprečju agregatna zrna v betonu zavzamejo do 70% njegove prostornine, in sicer od tega pri drobljenem agregatu največkrat približno pol zrna drobnega agregata in pol zrna grobega agregata. Preostanek prostornine betona pa tvorijo vezivo (12-15%), voda (15-20%) in zračne pore (1-3%).

Veliko vlogo pri oblikovanju lastnosti betona ima vodocementno razmerje (masno razmerje med količino vode in cementa pri pripravi cementne paste), ki je neposredno povezano s količino vode v betonski mešanici.

Da se prične proces strjevanje betona, so potrebni določen čas, temperatura in primerna vlažnost. V obdobju, ki mu pravimo nega betona, mora biti beton v okolju s temperaturo in relativno vlago v določenem območju. V procesu gradnje je potreben čas nege od tri dni do treh tednov, odvisno od lokacije, oblike in dimenzije betonskega elementa ter klimatskih razmer okolice.

Da preverimo, ali smo dosegli želene lastnosti betona, ki ga vgradimo v konstrukcijo, oziroma ali smo se jim dovolj približali, izdelamo betonske preizkušance, na katerih se v laboratoriju izvaja ustrezna (praviloma mokra) nega vsaj 28 dni. Med rezultati preiskav lastnosti betona pridobljenih v laboratoriju in dejanskim obnašanjem betona v konstrukciji so mogoča velika odstopanja. Kompleksna struktura cementnega kamna in betona ima poleg osnovne lastnosti (trdnost), tudi druge karakteristike, ki so izredno odvisne od pogojev okolja med nego (vodotesnost, odpornost na oblikovanje razpok, krčenje, ...).

Vse osnovne sestavine betonske mešanice in dodatki vplivajo s svojimi lastnostmi in deleži na lastnosti sveže betonske mešanice in kasneje tudi na obnašanje strjenega betona vgrajenega v konstrukcijo. Najpomembneje je, da izberemo in po potrebi tudi analiziramo najprimernejšo sestavo betona za uporabo. S tem že v prvem koraku končne vgradnje betona v posamezno konstrukcijo opravimo velik delež v celotnem procesu, katerega rezultat sta ustrezna nosilnost in obstojnost armiranobetonske konstrukcije.

V nadaljevanju bodo prikazane posamezne sestavine betona in njihove lastnosti, ki vplivajo na končne karakteristike betona in s tem na nosilnost in obstojnost armiranobetonskih konstrukcij.

### **3.1 Cement**

Cement je siv prah, ki je po kemični sestavi silikatno hidravlično vezivo. Pridobiva se z mletjem tako imenovanega portland cementnega klinkerja - umetnega kamenega materiala. Cementni klinker nastaja pri žganju surovinske mešanice apnenca in glinice do temperature sintranja (temperatura pri kateri se komponente začnejo površinsko mehčati) v temperaturnem

območju od 1300 do 1500°C. Ko se cementni klinker ohladi, se zmelje v zrnca s premerom 0,001 do 0,1 mm. Glede na finost mletja se ocenjuje specifična površina cementa po Blainu, ki se giblje med 2000 in 5000 cm<sup>2</sup>/g. Tako dobimo čisti portland cement (brez mineralnih dodatkov), ki ima sorazmerno konstantno kemijsko sestavo. Vsebuje osnovne sestavine, ki jih označujemo z oznakami: (CaO) → C, (SiO) → S, (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) → A, (SO<sub>3</sub>) → F in primesi Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, SO<sub>3</sub> (zaradi prisotnosti sadre), MgO in druge. Primesi ki jih vsebuje čisti portland cement, so škodljive, vendar se jih težko znebimo, ker so vzrok nečistosti osnovne surovine. Čisti portland cement sestavljajo klinkerski minerali. Osnovni klinkerski minerali so: alit, belit, celit in zelit, kot je prikazano v preglednici 1.

**Preglednica 1: Klinkerski minerali v portland cementu in njihove lastnosti (Bokan in Žarnić, 2006).**

<i>OZNAKA</i>	<i>IME</i>	<i>DELEŽ</i>	<i>LASTNOSTI</i>
C <sub>3</sub> S	Trikalcijev silikat-alit	45-60%	Najpomembnejši, pospešuje proces hidratacije, povzroča visoke trdnosti
C <sub>2</sub> S	Dikalcijski silikat-belit	20-30%	Zavira in podaljšuje proces hidratacije in strjevanja, sprošča manj hidratacijske toplote
C <sub>3</sub> A	Trikalcijev aluminat-celit	4-12%	Pospešuje strjevanje in razvijanje hidratacijske temperature
C <sub>4</sub> AF	Tetrakalcijev aluminat-zelit	10-20%	Zavira strjevanje, odporen na sulfatno korozijo

Cementu je poleg cementnega klinkerja dodana še manjša količina sadre (do 5%), ki regulira čas vezenja cementa. Kemijska sestava čistega portland cementa, ki ga v skladu z zahtevami standarda SIST EN 197-1: Cement - 1. del: Sestava, zahteve in merila skladnosti za običajne cemente, označimo kot CEM I, je prikazana v preglednici 2.

Cement pri reakciji z vodo (hidrataciji) prične z vezanjem in se strdi. Pri strjevanju cementne paste nastaja trden cementni kamen, ki je pretežno sestavljen iz kalcijevih silikat hidratov, ki ostanejo trdni in stabilni tudi v vodi.

**Preglednica 2: Kemijska sestava čistega portland cementa (Bokan in Žarnić, 2006).**

<i>Spojina</i>	<i>Oznaka</i>	<i>Delež</i>
CaO	C	62-67%
SiO <sub>2</sub>	S	19-25%
Al <sub>2</sub> O	A	2-8%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F	1-5%
SO <sub>3</sub>	S	Max 3,5-4,5%
CaO (nevezan)		Max 2%
MgO		Max 5%
Na <sub>2</sub> O in K <sub>2</sub> O		0,5-1,3%

### 3.1.1 Vpliv cementa na lastnosti betona

Lastnosti cementa se določajo z standardiziranimi preiskavami. Vzorci se odvzamejo s sondo ter se razdelijo na tri enake dele. Prvi del se uporabi za osnovne, drugi za primerjalne raziskave, tretji pa se hrani za morebitne poznejše dokazne preiskave. Pomembne lastnosti cementa so: finost mletja, prostorninska masa brez por in votlin, prostorninska obstojnost, standardna konsistenca ter začetek in konec vezanja, vlažnost in žarilna izguba. Cement delno hidratizira že v stiku z zračno vlago, zaradi česar nastanejo strjene kepe.

Standard SIST EN 197-1: Cement - 1. del: Sestava, zahteve in merila skladnosti za običajne cemente loči 27 različnih tipov cementa, ki jih razporeja v pet skupin:

- CEM I – portlandski cement
- CEM II – portlandski mešani cement
- CEM III – žlindrin cement
- CEM IV – pucolanski cement
- CEM V – mešani cement

### **3.1.1.1 Finost mletja**

Finost mletja vpliva na proces hidratizacije tako, da imajo cementi z drobnejšimi zrnji višje zgodnje trdnosti. Cementi z bolj finimi zrnji med hidratacijo razvijajo več toplote in se zato bolj krčijo. Ker hidratacija poteka s površine cementnih zrn proti njihovi notranjosti, pride pri finih zrnih do popolnejše hidratizacije kot pri grobih zrnih. Finost cementa definirata dva parametra:

- specifična površina zrn (vsota površine vseh zrn v enoti mase),
- granulometrična sestava cementa (ni pravila za najboljšo sestavo, zato se v praksi uporablja le specifična površina zrn).

V praksi pa se uporabljata dva postopka za določanje finosti cementa:

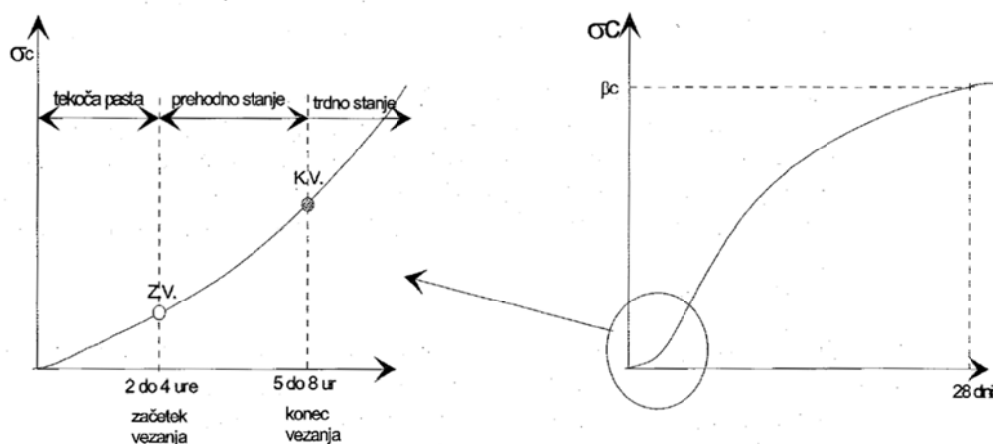
- sedimentacijska metoda (Wagnerjev turbidimeter) in
- metoda z zračnim tokom (Blainov permeabilimeter).

Zgornji dve metodi uporabljata različne principe preizkušanja finosti cementa, in sicer sedimentacijska metoda meri spremembo intenzitete svetlobe, ki jo prepušča suspenzija cementa v petroleju med sedimentiranjem, metoda z zračnim tokom pa meri hitrost prehoda zraka skozi zbit vzorec cementa, ki je odvisna od velikosti in števila por.

Nobena od naštetih preiskav finosti cementa nam ne podaja absolutne površine zrn, omogočata pa primerjavo rezultatov preizkušanja različnih vrst cementa.

### **3.1.1.2 Standardna konsistenca cementne paste**

Cementno pasto se pripravi po standardiziranem postopku. Standardno konsistenco se meri z Vicat-ovim aparatom, katerega sonda ( $\varnothing 10\text{mm}$  in mase 300g) se spusti v cementno pasto vgrajeno v ustrezen kalup (preizkušane). Če se igla ustavi 4 – 8 mm nad podlago, na kateri je preizkušane, je konsistenca cementne paste standardna. Na cementni pasti standardne konsistence določamo začetek (igla Vicat-ovega aparata se ustavi 3 – 9 mm nad podlago preizkušance) in konec vezanja (igla prodre le še 0,5 mm v preizkušane) cementne paste. Iz slike 12 je razviden potek vezanja cementne paste v prvih urah in njeno nadaljnje pridobivanje tlačne trdnosti v naslednjih 28 dneh.



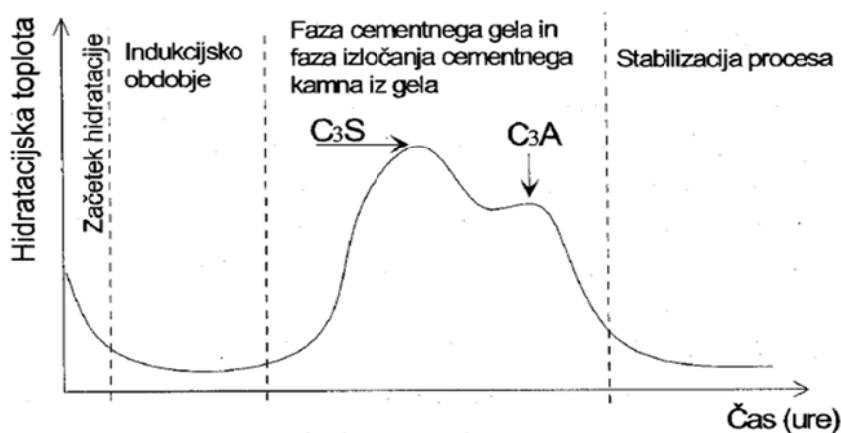
Slika 12: Časovni potek vezanja (levo) in strjevanja (desno) cementne paste.

Vir: Žarnić, 2005

### 3.1.1.3 Hidratacijska toplota

Toploto, ki se razvija med vezanjem in strjevanjem cementa pri določeni temperaturi okolja imenujemo hidratacijska toplota. Temperatura okolice močno vpliva na hitrost nastajanja toplote, in sicer dobimo pri povišanju temperature okolice tudi višjo hidratacijsko toploto v betonu. Velik prispevek k razvoju hidratacijske toplote ima poleg  $C_3S$ , tudi  $Al_2O_3$ . Iz slike 13 je razviden potek hidratacijske toplote in vpliv različnih hitrosti strjevanja mineralov  $C_3S$  in  $C_3A$ .

Intenzivnost sproščanja hidratacijske toplote je tako odvisna od vrste in količine mineralov, ki jih vsebuje določena vrsta cementa, temperature okolice, pri kateri cement veže in se strjuje, oblike in tudi velikosti preseka betonske konstrukcije.



Slika 13: Razvoj hidratacijske toplote v prvih urah vezanja cementa

Vir: Žarnić, 2005

#### **3.1.1.4 Krčenje**

Cementna pasta je med procesom vezanja in strjevanja podvržena krčenju. Različni vzroki zaradi katerih prihaja do krčenja so:

- hidrationsko krčenje nastane zaradi kemijske reakcije, pri kateri se prostornina čvrste cementne mase zmanjša za prostornino 25% reakcijske vode,
- plastično krčenje v primeru slabe nege betona, ki se razvije v prvem dnevu. Nastane zaradi površinskega izhlapevanja vode v času vezanja cementne paste, pojavijo se površinske razpoke,
- izsuševanje cementnega kamna in manjšanje meniskov v kapilarah privedeta do povečanja kapilarnih sil, ki povzročajo ožanje kapilar in nadaljnje povečanje kapilarnih sil.

Krčenje je večje pri cementnih pastah, ki imajo drobnejša zrna cementa, večje vodocementno razmerje in ki razvijajo višjo hidrationsko toploto. Krčenje cementnega kamna je eden osnovnih vzrokov krčenja gradiv, ki vsebujejo cement (malte, betoni).

#### **3.1.1.5 Stabilnost prostornine**

Cementna pasta zaradi različnih zunanjih vplivov spreminja svojo prostornino, kar povzroča nastanek razpok. Najbolje je, da poteka krčenje na zraku in nabrekanje v vodi enakomerno. Nabrekanje se lahko pojavi tudi zaradi hidrationske MgO ali apnenih zrn ter zaradi  $C_3A$  reakcije s sulfati, ko se je trdna struktura cementnega kamna že oblikovala (sulfatna ekspanzija).

#### **3.1.1.6 Tečenje (lezenje)**

Zaradi kratkotrajnih obremenitev nastanejo trenutne deformacije cementnega kamna, dalj časa trajajoča obtežba pa povzroča trajne deformacije zaradi pojava tečenja. Večje deformacije nastanejo pri mlajšem cementnem kamnu, kjer se hidrationska še ni povsem končala. Deformacije cementnega kamna pod stalno obtežbo se stabilizirajo po petih do desetih letih, ko se proces tečenja ustavi. Deformacije zaradi tečenja so lahko 2 do 3 krat večje od deformacij pod enako trenutno obtežbo. Velikost deformacij cementnega kamna zaradi tečenja je odvisna od vrste in količine cementa, vodocementnega razmerja, intenzivnosti obremenitev in vplivov okolja. S hitrejšim obremenjevanjem dosežemo večjo trdnost in hkrati



tudi modul elastičnosti, saj je ta večji pri večji hitrosti obremenjevanja. Pri določeni hitrosti pa se povečevanje modula elastičnosti v odvisnosti od naraščanja hitrosti stabilizira.

### 3.2 Agregat

Agregat je mineralni material v obliki zrn, ki ga uporabljamo kot polnilo v maltah in betonih.

Ločimo dve vrsti mineralnega agregata glede na način pridobivanja:

- ostrorobi lomljenec, ki se ga pridobiva v kamnolomih z miniranjem in kot tehnični kamen, ki se nato drobi na frakcije nekaj deset milimetrov. Ločimo silikatne kamenine (magnatske, sedimentne in metamorfne) in karbonatne kamenine (sedimentne in metamorfne) (sliki 14 in 15),
- gramoz aluvialnega nastanka, se pridobiva iz gramoznic ali neposredno iz rečnih strug v primeru regulacije struge (slika 16).



**Slika 14: Pridobivanje tehničnega kamna v kamnolomu.**

Vir: [www.inter-kop.com](http://www.inter-kop.com)



**Slika 15: Drobljenje in sortiranje drobljenega agregata po različnih frakcijah.**

Vir: [www.inter-kop.com](http://www.inter-kop.com)



**Slika 16: Sejani gramoz kot agregat za beton.**

Vir: [www.nograd-gm.si/strani/si/gramoznica](http://www.nograd-gm.si/strani/si/gramoznica)

Ker je cement najdražja sestavina betona, je zaželeno, da se uporabi minimalna količina, ki je potrebna za doseganje željenih lastnosti in karakteristik. Agregat lahko zaseda 60 – 75% celotnega volumna betona, pri betonih nižjih trdnosti pa tudi do 85% celotnega volumna betona. Zato lastnosti agregata močno vplivajo na lastnosti betona in niso zanemarljive. Kvaliteta agregata je zelo pomembna pri trajnosti betonskih konstrukcij. Agregati, ki se uporabljajo za betone so različnih oblik, velikosti in mineraloško-petrografske sestave. Pri

izbiri vrste agregata, moramo zato upoštevati lastnosti, ki se jih zahteva od betona - na podlagi teh se določi vrsta agregata (oblika, gostota, zrnastostna sestava, mineraloško-petrografska sestava, trdnost, ...). Tako lahko s pravilno izbiro agregata vplivamo na lastnosti betona že v svežem stanju (obdelavnost, kohezivnost) in pozneje v strjenem stanju (prostorninska masa, elastični modul, in dimenzijska stabilnost betona). Te lastnosti so v največji meri odvisne od gostote in trdnosti agregata, torej od fizikalnih in ne od kemijskih karakteristik materiala. Poleg gostote (poroznosti) pa tudi oblika in tekstura površine agregatnih zrn vplivata na lastnosti betona.

Vsi agregati, katerekoli mineraloško-petrografske sestave, kemično reagirajo z izrazito bazičnimi komponentami cementnega kamna. Vseeno pa se zaradi njihove vloge v betonu običajno upošteva, da je agregat le inertna faza v matrici cementnega kamna.

V smislu razvoja hidratacijske toplote, oziroma prirastka temperature v betonu med procesom hidratacije, ima mineralni agregat pomembno vlogo. Agregat znižuje hidratacijsko temperaturo betona, ki nastaja pri hidrataciji cementa in zmanjšuje krčenje betona.

### **3.2.1 Vpliv agregata na lastnosti betona**

#### **3.2.1.1 Gostota**

Gostota agregatov je odvisna od njihovega izvora in se lahko giblje od  $500 \text{ kg/m}^3$  (lahki agregati) do  $7000 \text{ kg/m}^3$  (izjemno težki magnetitni agregati). Gostota običajnih agregatov je med  $2200$  in  $2800 \text{ kg/m}^3$ . Tako poznamo lahke betone in betone z visoko gostoto. Betoni z visoko gostoto se uporabljajo za zaščito pred ionizirajočim sevanjem in rentgenskimi žarki.

#### **3.2.1.2 Maksimalno zrno**

Zrna agregata delimo na groba (zrna premera nad  $4 \text{ mm}$ ) in drobna (zrna premera pod  $4 \text{ mm}$ ) zrna agregata. Velikost maksimalnega zrna v betonu je odvisna od vrste in dimenzij konstrukcije, v kateri uporabljamo beton. V splošnem velikost maksimalnega zrna ne sme presegati  $25\%$  minimalne dimenzije konstrukcije in najmanjše razdalje med vzporednimi armaturnimi palicami zmanjšane za  $5 \text{ mm}$ , na kar je treba še posebej paziti pri močno armiranih prerezi. Največkrat se uporablja maksimalno zrno agregata velikosti  $16 \text{ mm}$  ali največ  $32 \text{ mm}$ . V masivnih konstrukcijah in pri gradnji cest pa je lahko maksimalno zrno tudi  $64 \text{ mm}$ . Povečanje velikosti zrn agregata zmanjšuje njegovo skupno površino v celotni masi

betona. S tem se zmanjša tudi potreba po vodi in cementu ter zniža cena betona. V masivnem betonu velika zrna in kamni zmanjšujejo hidratacijsko temperaturo, ker odvajajo toploto. Po drugi strani zaradi velikih stičnih površin tak beton dosega manjšo trdnost. Drobne frakcije agregata so potrebne za enakomerno zapolnitev prostora med večjimi zrnji in morajo biti dodane v ustreznem razmerju do maksimalnega zrna .

### **3.2.1.3 Oblika zrn**

Od izvora agregata je odvisna tudi njegova oblika. Pri aluvialnih agregatih so idealno pravilna zrna kroglaste oblike, pri lomljenih pa kvadrataste. Večinoma pa so zrna vmesne oblike in so bolj ali manj "nepravilna". Zaobljena zrna omogočajo boljšo vgradljivost, vendar se z lomljenim agregatom lahko dosega višje trdnosti pri enakem vodocementnem (v/c) razmerju. Zato se za konstrukcije, kjer so zahtevane višje trdnosti betona uporablja lomljeni agregat. Pri visokonosilnih betonih ostrorobi agregati ne vplivajo na enak način, saj se tudi z njimi da doseči visoko vgradljivost. Zrna agregata s poudarjeno dimenzijo (paličasta, ploščata) imajo veliko specifično površino in poudarjene izotropne lastnosti, zato niso najbolj dobrodošla oblika agregatnih zrn.

### **3.2.1.4 Površinska tekstura**

Poznamo dva ekstrema glede površin agregata: groba in fina površina. Zrna z grobo površino nekoliko zmanjšujejo vgradljivost betona, prispevajo pa k njegovi višji trdnosti, če so tudi sama dovolj trdna. Groba površina zrna omogoča tudi dobro sprijemnost med cementnim kamnom in zrnom agregata.

### **3.2.1.5 Trdnost**

Z agregati nizkih trdnosti se ne da doseči betona visokih trdnosti, ne glede na količino, vrsto in kakovost drugih komponent (cement, voda, dodatki). Zrna nizkotrdnega agregata so razmeroma deformabilna (nizek modul elastičnosti) in tako pri obremenitvi prevzamejo njen manjši delež, večjega pa prevzame cementni kamen, ki se zaradi tega predčasno poruši. Zato za izdelavo betonov visoke trdnosti uporabljamo trdne agregate (granitna zrna), ki pa pri srednjih obremenitvah betona ne pridejo v celoti do izraza in so zato ekonomsko neupravičeni. Primernost posameznih zrn agregata za pripravo visokotrdnih betonov se preverja z analizo porušitve betonskih kock. Če se pri poružitvi betona poruši večje število zrn agregata (npr. več kot 25 %), velja razmisliti, da se uporabi trdnejši agregat za doseg boljšega

rezultata. V praksi je treba upoštevati tudi ekonomičnost izdelave betona in preučiti, ali je mogoče večja količina cementa cenejša rešitev kot nabava trdnejšega in praviloma dražjega agregata.

### **3.2.1.6 Zrnavost (granulometrijska sestava)**

Z zrnavostjo opisujemo relativno razmerje različnih velikosti zrn med maksimalnim zrnom in najdrobnejšim prisotnim delcem materiala, ki gre skozi sito z odprtino 0,25 mm. Ustrezna zrnavostna sestava agregata omogoča izdelavo svežega betona ustreznih plastičnih lastnosti (vgradljivost, kohezija, odpornost proti izločanju vode) in strjenega betona ustreznih lastnosti (trdnost, trajnost in videz površine). Ustrezna zrnavostna sestava agregata omogoča dobro zapolnjenje celotnega prostora in onemogoča segregacijo sveže betonske mešanice.

### **3.2.1.7 Kakovost**

Na kakovost agregata vplivajo različne primesi, ki so prisotne v agregatu in negativno vplivajo na lastnosti betona.

- Praškasti delci so drobni mineralni delci, ki padejo skozi sito z odprtino 0,075mm. Ker so tako drobni imajo veliko specifično površino. Pri pripravi betonske mešanice brez kemijskega dodatka tipa plastifikator ali superplastifikator je potrebno zato dodati večjo količino vode, da se zagotovi ustrezna vgradljivost betona. Mivka pogosto vsebuje glinaste delce, ki zmanjšujejo sposobnost sprijemanja cementne paste z mineralnim agregatom ter tako vplivajo na znižanje trdnosti strjenega betona.
- Organske primesi (humozni delci) so po naravi kisle in zmanjšujejo alkalnost cementne paste, ki je nujna za proces njene hidratacije. To vpliva na vezanje in strjevanje cementne paste in na njeno končno trdnost. Primesi izvirajo predvsem iz nečistoč, v katerih so ostanki rastlinja in različnih maščob, ki onesnažujejo nahajališča gramoza.
- Soli so prisotne v morskih agregatih na katerih tvorijo tanke plasti na površju. Sol pospešuje zgodnje faze hidratacije cementa in povzroča korozijo armature v betonu, ki pa ni zaželjena. Zato je treba vsebnost soli v betonu za armirane in prednapete konstrukcije strogo kontrolirati. V skladu z določili slovenskega standarda SIST 1026:2008 uporaba morskih agregatov za izdelavo betona v Sloveniji ni dovoljena.

- Posamezni minerali, ki so v zrnih agregata, močno alkalno reagirajo. V odvisnosti od neurejenosti strukture agregata, njegove poroznosti in velikosti delcev se lahko ob prisotnosti hidroksilnih in alkalkovinskih ionov oblikuje alkalno-silikatni gel različne kemijske sestave. Ta povzroči porušitev silikatne strukture agregata v betonu in je visoko hidroskopičen. Če se beton, v katerem je nastal alkalno-silikatni gel nahaja v vlažnem okolju, bodo nastali v strukturi betona visoki hidravlični pritiski, ki bodo povzročili poškodbe v betonu.

### **3.2.1.8 Vlažnost**

Vlažnost je zelo pomemben parameter, saj vsi agregati vsebujejo določeno količino vlage, razen agregata osušenega v peči. Pri pripravi betonske mešanice je potrebno ugotoviti in upoštevati tudi vlažnost agregata, saj vlaga v agregatu prispeva k spremembi vgradljivosti betona in spremembi vodocementnega (v/c) razmerja.

Glede na količino vlage v agregatu ločimo štiri stanja, in sicer:

- agregat, osušen v peči pri temperaturi 105 °C, ki ne vpliva na kemično vezano vodo v mineralih,
- zračno suh agregat, kjer so vse površine suhe (tako suh agregat najdemo pri vrhu kupov na deponijah ob stabilno suhem vremenu),
- agregat, zasičen z vodo vendar površinsko suh,
- moker agregat.

Če je agregat, osušen v peči ali zračno suh, moramo pri pripravi betona upoštevati potrebo po dodatni vodi, saj velja za nekatere agregate, da imajo veliko sposobnost vpijanja. Najbolj idealen agregat za pripravo betona je v stanju zasičenosti s suho površino, saj ne zahteva odstopanj od projektirane količine vode. Najpogosteje pa je agregat moker, tako da je del vode na površini agregatnih zrn. V takih primerih moramo s preiskavo ugotoviti, kolikšna je količina vode na površini agregatnih zrn ter jo upoštevati pri pripravi betona.

### **3.3 Reaktivni mineralni dodatki**

Veliko materialov, tako naravno, kot tudi umetno pridobljenih, sama zase niso hidravlična veziva, ampak lahko njihove hidravlične lastnosti aktiviramo, če jim dodamo apno, portland

cement ali alkalije iz drugih virov. V nadaljevanju bodo predstavljena granulirana plavžna žindra, ki je latentno hidravlično vezivo ter elektrofiltrski pepel in mikrosilika, ki sta pucolanska mineralna dodatka. Reaktivni mineralni dodatki so silikatni ali alumino-silikatni materiali, ki so v obliki finih delcev. Pucolanski mineralni dodatki v prisotnosti vlage kemijsko reagirajo s kalcijevim hidroksidom, ki nastane kot produkt hidratacije čistega portland cementa. Pri tem se oblikuje C-S-H (kalcijeva silikatno hidratna) faza in drugi hidravlični produkti.

S pucolanskimi in latentno hidravličnimi dodatki lahko zamenjamo del čistega portland cementa (klinkerja). Cement lahko vsebuje tudi nepucolanske dodatke, kot je mlet apnenec. Vrste in količine mineralnih dodatkov, ki se lahko dodajajo cementom, ki izpolnjujejo zahteve standarda SIST EN 197-1: Cement- I. del: Sestava, zahteve in merila skladnosti za običajne cemente podaja preglednica 3. Ista preglednica podaja tudi oznake teh materialov, ki se uporabljajo pri označevanju različnih vrst cementov. Dovoljene količine mineralnih dodatkov v betonih so podane v ustreznih standardih. V Sloveniji je to v standardu SIST 1026:2008 - Beton-1.del: Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost – Pravila za uporabo SIST EN 206-1.

**Preglednica 3: Razvrščanje cementov glede na glavne sestavine in dovoljen delež mineralnih dodatkov po standardu SIST EN 197-1.**

Vrsta cementa	Opis	Glavne sestavine	Delež mineralnih dodatkov
CEM I	Čisti portland cement	Klinker	0%
CEM II	Portland cement z mineralnimi dodatki	Klinker, granulirana plavžna žindra (S), mikrosilika* (D), pucolan(P,Q), elektrofiltrski pepel (V,W), žgani skrilavec, apnenec(L), mešani mineralni dodatek (M)	II/A 6-20% II/B 21-35%
CEM III	Žlindrin cement	klinker, granulirana žindra (S)	III/A 36-65% III/B 66-80% III/C 81-95%
CEM IV	Pucolanski cement	klinker, mikrosilika (D), pucolan (P, Q), elektrofilterski pepel (V)	IV/A 11-35% IV/B 36-55%

CEM V	Mešani cement	klinker, granulirana žindra (S), pucolan (P,Q), elektrofilterski pepel (V)	V/A 36-60% V/B 61-80%
*	V primeru mikrosilike je največji delež mineralnega dodatka 10%		

### 3.3.1 Granulirana plavžna žindra

Granulirana plavžna žindra je steklasta snov, ki jo v največjem deležu sestavljajo kalcijevi silikati in alumosilikati. Žindra je latentno hidravlično vezivo saj se hidravlične lastnosti aktivirajo z dodajanjem alkalij. Iz deleža oksidov v njeni sestavi (Preglednica 3) je razvidno, da vsebuje manjši delež CaO in večji delež SiO<sub>2</sub> kot portland cementni klinker.

Granulirana plavžna žindra se melje v prah, s katerim največkrat nadomestimo do 70% cementnega klinkerja v vezivu. Določen delež cementnega klinkerja je potreben za zagotavljanje alkalij za začetek hidratacije. V nasprotju s portland cementnim klinkerjem žindra nastaja v redukcijskih pogojih. Kot delni nadomestek čistega portland cementa se uporablja že več kot 100 let.



**Preglednica 4: Kemijska sestava granulirane plavžne žindre (Bokan in Žarnić, 2006).**

<i>Spojina</i>	<i>Delež</i>
CaO	36-44%
SiO <sub>2</sub>	29-38%
Al <sub>2</sub> O	10-18%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2-2,0%
SO <sub>3</sub>	1-2,5%
MgO	4-12%
Na <sub>2</sub> O in K <sub>2</sub> O	1-2%

### 3.3.2 Elektrofiltrski pepel

Elektrofiltrski pepel je heterogen droben prah, ki je sestavljen iz silicijevih, aluminijevih in železovih oksidov. Nastaja pri izgorevanju uprašenega premoga v termoenergetskih objektih in se pridobiva z odstranjevanjem delcev iz dimnih plinov z elektrostatičnimi filtri. Njegova sestava je zelo odvisna od uporabljenega premoga in temperaturnih režimov, ki jim je izpostavljen. Glede na vsebnost CaO jih delimo na silicijske (manj kot 5% aktivnega CaO) in kalcijske (več kot 5% aktivnega CaO). Elektrofiltrski pepel je, poleg mikrosilike, primaren pucolanski material. V primerjavi s cementnim klinkerjem vsebuje bistveno manj kalcijevega oksida in bistveno več pucolanskih oksidov silicija, aluminija in železa (Preglednica 4). Tako kot portland cement tudi elektrofiltrski pepel nastaja v oksidacijskih pogojih. Elektrofiltrski pepel, ki se uporablja kot zamenjava cementnega klinkerja, mora izpolnjevati zahteve standarda SIST EN 450:2005 - Elektrofiltrski pepel - 1. del: Definicije, specifikacije in merila skladnosti. Z njim lahko zamenjamo do okrog 30% cementnega klinkerja.

**Preglednica 5: Kemijska sestava elektrofiltrskega pepela (Bokan in Žarnić, 2006).**

<i>Spojina</i>	<i>Delež</i>
CaO	3-30%
SiO <sub>2</sub>	30-55%
Al <sub>2</sub> O	4-10%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2-2,0%
SO <sub>3</sub>	<3%
MgO	<7%
Na <sub>2</sub> O in K <sub>2</sub> O	1-2%

### 3.3.3 Mikrosilika

Mikrosilika je stranski produkt pri proizvodnji silicijevih ali ferosilicijevih zlitin v elektro obločnih pečeh. Mikrosilika nastaja pri temperaturi 2000°C med pretvorbo visoko-čistega kremena v silicij. Hlapi silicijevega oksida se v višjem delu peči, ki je hladnejši, mešajo s kisikom in kondenzirajo v zelo drobne kroglaste delce, ki vsebujejo več kot 90% SiO<sub>2</sub> v steklasti obliki. Zaradi velike specifične površine je mikrosilika zelo reaktivna. Z njo praviloma zamenjamo do 10% cementnega klinkerja.

### 3.4 Voda

Voda je zelo pomembna komponenta za izdelavo betonske mešanice s cementnim vezivom, saj je pogoj za proces hidratacije cementa. Voda v svežem betonu deluje kot komponenta za doseganje obdelavnosti betonske mešanice.

Za izdelavo mešanic s cementnim vezivom se na splošno lahko brez dodatnih preiskav uporabi vsaka pitna voda iz vodovoda. Če uporabljamo vodo iz drugih virov (površinske vode, industrijske vode, itd.) pa mora biti pred uporabo s preiskavami dokazano, da ne škoduje strjenemu cementnemu kamnu, saj lahko vsebuje cementnemu kamnu škodljive snovi. Voda, ki je primerna za uporabo v betonskih mešanicah izpolnjuje zahteve, ki jih določa standard SIST EN 1008- Voda za pripravo betona -Zahteve za vzorčenje, preskušanje

in ugotavljanje primernosti vode za pripravo betona, vključno vode, pridobljene iz procesov v industriji betona.

Snovi, ki so lahko prisotne v vodi in so škodljive za beton so:

- organske primesi (zemlja, humus, masti, itd.),
- sulfati (soli, ki med kristalizacijo povečajo volumen),
- kloridi (soli, ki povzročijo korozijo betona),
- mulj.

Z zmanjšanjem količine vode v betonski mešanici in s tem tudi z nižjim vodocementnim razmerjem prispevamo k:

- zvišanju mehanskih lastnosti,
- zvišanju vodoneprepustnosti in znižanju absorptivnosti betona,
- zvišanju odpornosti na vremenske vplive in agresivnost okolja,
- boljši sprijemnosti med plastmi betona in betonom in armaturo,
- zmanjšanju prostorninskih sprememb pri sušenju in namakanju ter,
- znižanju števila in velikosti razpok zaradi krčenja.

Neprimernost vode se kasneje lahko pokaže tudi s pojavi, kot so:

- eflorescenca - površinsko izločanje soli,
- prostorninska nestabilnost cementnega kamna,
- sprememba časovnega poteka hidratacije paste,
- sprememba barve paste in
- različne vrste korozije cementnega kamna.

### **3.5 Kemijski dodatki**

Kemijski dodatki so snovi, ki se dodajajo betonu, ki je izpostavljen agresivnim vplivom in velikim mehanskim obremenitvam. Kemijski dodatki se dodajajo betonu, da s svojim fizikalnim in/ali kemijskim delovanjem izboljšajo lastnosti svežega in/ali strjenega betona. Betonu se dodajo pred ali med mešanjem v majhnih količinah, ki so običajno izražene v odstotkih na maso cementa.

Kemijski dodatki betonu so razvrščeni v naslednje osnovne skupine:

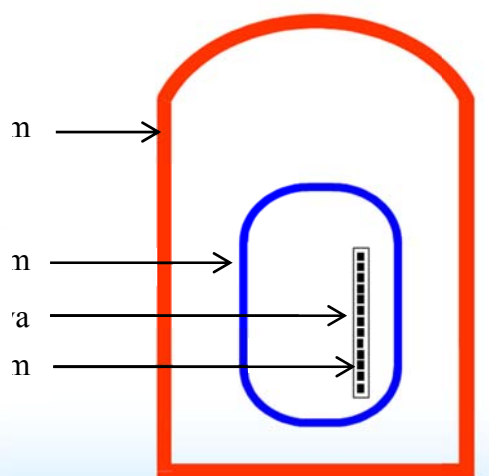
- **plastifikatorji in superplastifikatorji** so dodatki, katerih osnovni učinek je povečanje plastičnosti svežega betona in s tem zmanjšanje potrebe po vodi. Obstajajo pa tudi negativni vplivi teh dodatkov, ki nastanejo predvsem, če jih dodamo v večji količini. Takrat po navadi prihaja do zavlačevanja vezanja, vendar pa to običajno ne vpliva na razvoj končne trdnosti betona,
- **aeranti** so dodatki, ki pri mešanju sveže betonske mešanice ustvarjajo mikronsko majhne zračne mehurčke, ki zaradi veliko večje dimenzije prekinjajo kapilarne pore. S tem dodatkom dosežemo večjo odpornost proti mrazu in solem,
- **pospeševalci vezanja** so dodatki, ki pospešujejo hidratacijo cementa in se uporabljajo v hladnih letnih časih. Skrajšajo čas negovanja in obenem zaščitijo ter pospešujejo razvoj trdnosti, kar pomeni hitrejše razopaževanje,
- **zaviralci vezanja** so dodatki, ki omogočajo upočasnjeno vezanje cementa in se uporabljajo predvsem za kompenzacijo vpliva visokih temperatur okolja in kot kontrola vezanja v masivnih betonih,
- **gostila** so dodatki, ki učinkujejo na kemijski osnovi, tako da se vključujejo v kemijski proces hidratacije cementa, pri čemer reagirajo s cementnimi minerali, nastali produkti pa zapolnjujejo kapilarne pore v cementnem kamnu, s čimer se poveča vodotesnost betona.

## 4 ZASNOVA BETONSKEGA ZADRŽEVALNEGA HRAMA

Jedrske konstrukcije so sestavljene iz več varnostnih pregrad, ki preprečujejo nekontrolirano sproščanje radioaktivnih snovi v okolje. Celotni varnostni sistem je sestavljen iz štirih zaporednih varnostnih pregrad:

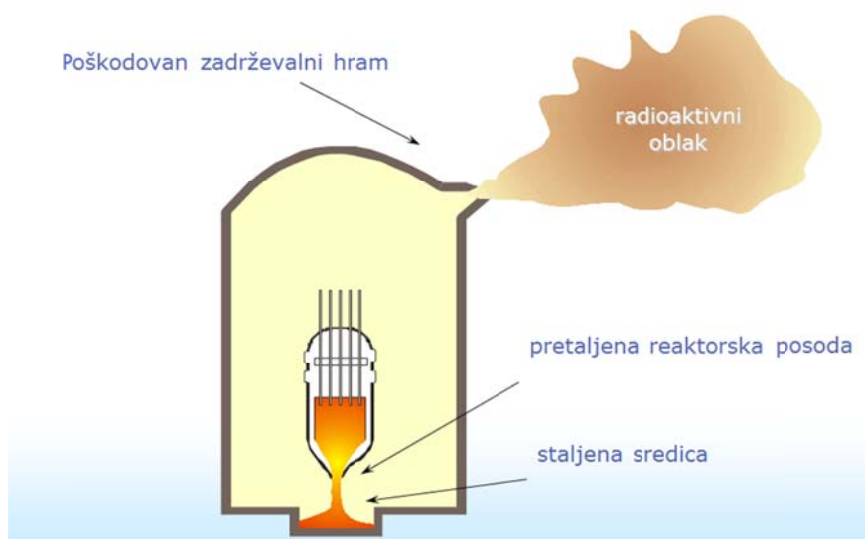
- prva pregrada je samo jedrsko gorivo v tabletkah, ki zadržuje radioaktivne snovi v sebi,
- druga pregrada je srajčka, ki obdaja gorivne tabletko in preprečuje pobeg radioaktivnih plinov iz goriva,
- tretja pregrada je meja primarnega sistema (stene cevi, reaktorske posode in drugih primarnih komponent), ki zadržuje radioaktivno vodo za hlajenje reaktorja in
- četrta pregrada je zadrževalni hram, ki hermetično ločuje primarni sistem od okolja.

Osnovni cilj prvih treh pregrad je, da preprečijo prehod radioaktivnih snovi do naslednje pregrade, četrta pregrada (zadrževalni hram) pa preprečuje neposredno sproščanje radioaktivnih snovi v okolje jedrske elektrarne. Prav tako pa zadrževalni hram ščiti reaktor pred zunanjimi vplivi, naravnimi nesrečami, teroristični napadi in fizičnim dostopom. Na sliki 17 so shematično prikazane varnostne pregrade, na sliki 18 pa je po principu teoretično najhujšega scenarija prikazana najslabša možnost v primeru poškodbe varnostnih pregrad. In sicer: staljena sredica, pretaljena reaktorska posoda, poškodovan zadrževalni hram in tako omogočen izpust radioaktivnih snovi v okolico.



Slika 17: Varnostne pregrade

Vir: [www.icjt.org](http://www.icjt.org)



**Slika 18: Teoretično najhujša možna nesreča**

Vir: [www.icjt.org](http://www.icjt.org)

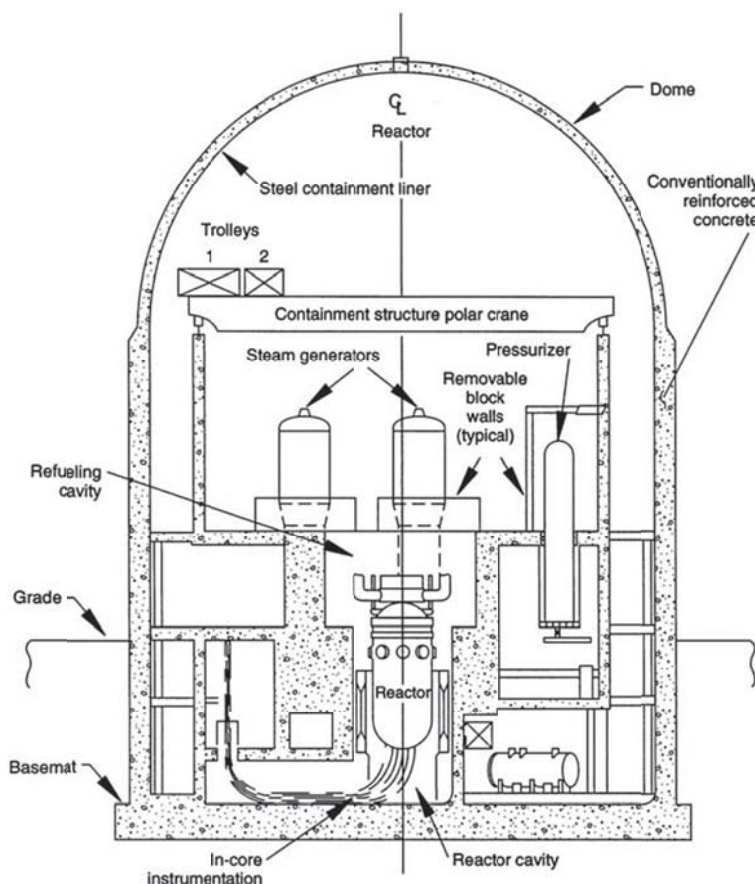
Betonske konstrukcije za zagotavljanje jedrske varnosti so sestavljene iz več delov, da v konceptu opravljajo več funkcij (npr. nosilnost, zaščita pred sevanjem in vodotesnost). Te konstrukcije, vključno s temeljenjem, so sestavljene iz naslednjih materialov: beton, armaturno jeklo, jeklo za prednapenjanje ter jeklena pločevina. Kakovost teh materialov je vzpostavljena na podlagi predpisov, certifikatov in nadzorov tekom celotne gradnje. V preglednici 6 so prikazani vplivi mehanskih lastnosti teh materialov na dimenzioniranje konstrukcijskih elementov.

**Preglednica 6: Odnos med mehanskimi lastnostmi in dimenzijami posameznih delov ( D.J. Naus, 2007).**

Mehanska lastnost	Debelina betona	Jeklena armatura	Sistem prednapetega jekla	Obloga
<b>Beton</b>				
Tlačna trdnost	X	X	nedosegljivo	
Začetni modul elastičnosti		X	X	X
Zakasneli modul elastičnosti			X	X
Krčenje, lezenje			X	X
<b>Jeklena armatura</b>				
Natezna trdnost na meji plastičnosti		X		
<b>Sistem prednapetega jekla</b>				
Natezna trdnost			X	
Natezna trdnost na meji plastičnosti			X	
Relaksacijska vrednost			X	
Faktor trenja			X	
<b>Obloga</b>				
Natezna trdnost na meji plastičnosti			X	

Prednapeti betonski zadrževalni hrami so armirani z navadnimi jeklenimi armaturnimi palicami in prednapetimi jeklenimi elementi za zagotovitev trdnosti in duktilnosti za dinamično obtežbo in nepredvidene dogodke, kot so naravne nesreče itd.

Slika 19 prikazuje PWR armirano betonski zadrževalni hram, ki je sestavljen iz cilindrične stene, kupole in temeljne plošče. Del zadrževalnika je pod nivojem terena in je izpostavljen soli in podzemni vodi. Zgornji del sten in kupola sta nad terenom in izpostavljena zunanjim vplivom.



**Slika 19: Shematični prikaz PWR zadrževalnega hrama**

Vir: Shah in Hookham, 1998

Slika 20 in slika 21 prikazujeta tipični prerez skozi armiranobetonske in prednapete betonske stene zadrževalnega hrama. Sliki prav tako prikazujeta tipično zgradbo zadrževalnika. Najpomembnejša značilnost oblike in zgradbe tega zadrževalnika je zunanja krovna plast betona. Minimalna debelina krovne plasti betona je bila določena s projektnimi standardi – ACI(1989), ASME(1992) in standardi starejših različic, ki temeljijo na pričakovanih pogojih izpostavljenosti in vrstah zdradbe; minimalna projektna debelina krovne plasti betona je 19 – 76 mm.

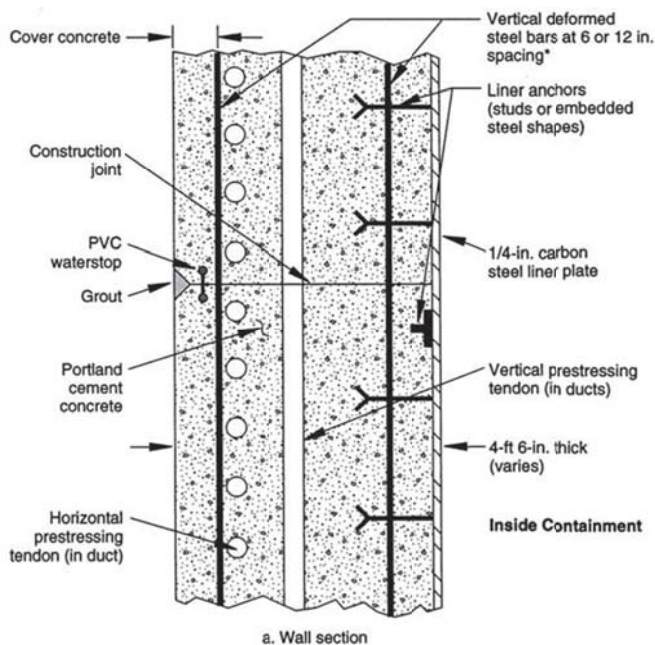
Krovni beton ima v splošnem enake lastnosti kot preostali beton, vendar se ga ne upošteva pri prevzemanju kakršnihkoli obremenitev. Zaščitni sloj je namenjen za zaščito armaturnega in prednapetega jekla pred korozijo ter zaščiti celotne betonske konstrukcije pred agresivnimi kemičnimi napadi.

Stene in kupola iz armiranega betona so bolj nagnjene k razpokanju betona, kot konstrukcije iz prednapetega betona, pri katerih je beton tlačno predobremenjen z nateznimi žicami za

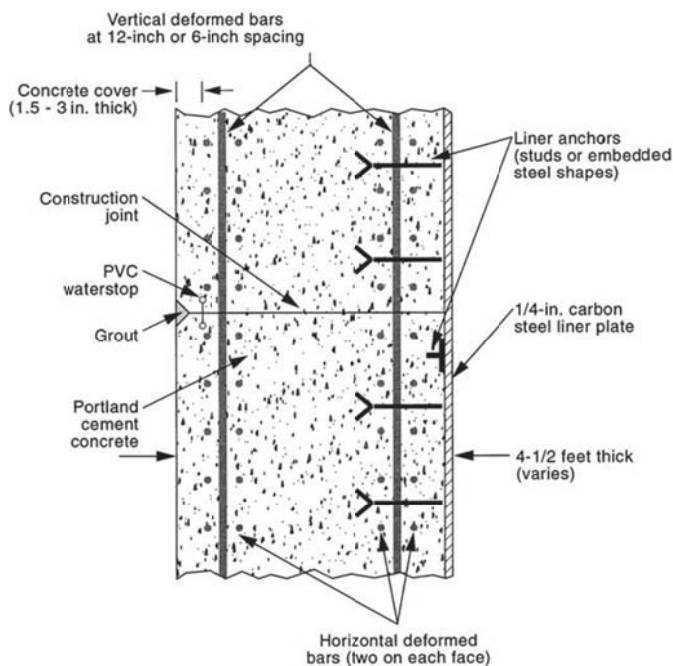


prednapenjanje. S prednapenjanjem so vzpostavljene tlačne napetosti v betonu, ki zmanjšujejo vpliv nateznih napetosti na beton, saj je znano da jih beton slabo prenaša. Pri zmanjšanju nateznih napetosti se tudi zmanjša število in velikost razpok v betonu.

Notranji del zadrževalnika je običajno obložen z varjenimi ploščami iz ogljikovega jekla, kot je prikazano na sliki 20 in 21, ki so praviloma prevlečene s temeljnim premazom iz cinka in poliamidnim apoksijem. Skupaj služita kot zaščita jeklenih plošč pred vplivom korozije. Manjši zadževalni hrami pa imajo znotraj zaščitene stene s ploščami iz nerjavečega jekla.



**Slika 20: Prerez prednapete betonske stene PWR zadrževalnega hrama**  
Vir: Shah in Hookham, 1998



**Slika 21: Prezrez armirano betonske stene PWR zadrževalnega hrama**  
Vir: Shah in Hookham, 1998

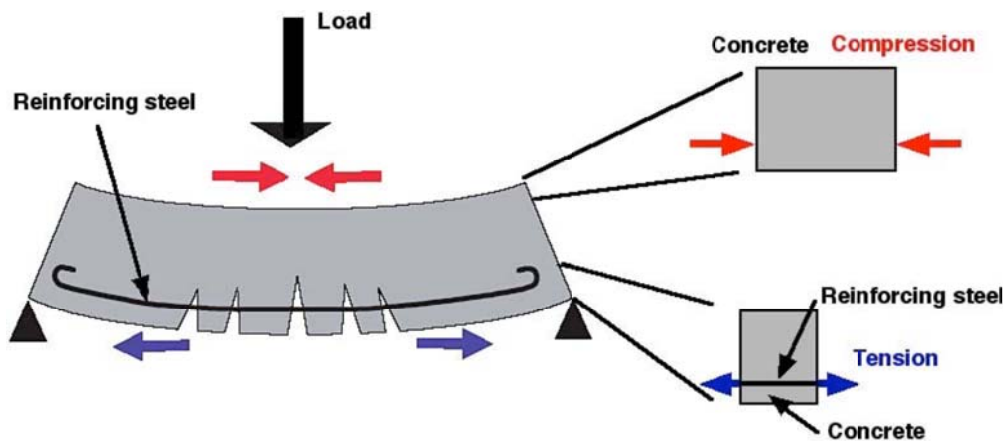
#### 4.1 Betonski del

Betoni, ki se uporabljajo za izvedbo takšnih objektov kot je zadrževalni hram jedrskega reaktorja, so navadno sestavljeni iz sestavin kot so: cement, ki razvije nizko hidratacijsko toploto in je sulfatnoodporen, voda, različni dodatki za doseganje potrebnih lastnosti svežega in strjenega betona, droben agregat in grobi agregat z normalno ali visoko gostoto. Željena trdnost in lastnosti betona so ponavadi odvisne od razmerja teh sestavin v betonski mešanici. Portland cement tipa II (cement z zmerno odpornostjo na delovanje sulfatov – vsebuje največ 8%  $C_3A$ ), ki je v skladu z ameriškim standardom ASTM C 150 (American Society for Testing and Materials) (ASTM 1992), je bil uporabljen pri gradnji zadrževalnih hramov jedrskih reaktorjev v ZDA, ker je bolj odporen na sulfatne napade, kot bolj pogosto uporabljen cement tipa I. Druga pomembna lastnost portland cementa tipa II je, da razvije nižjo hidratacijsko toploto kot cement tipa I. Ker so preseki betonskih elementov zadrževalnega hrama (npr. stena, kupola), razmeroma debeli, zato nižja hidratacijska toplota portland cementa tipa II zmanjšuje možnost nastajanja razpok zaradi temperaturnega deformiranja.

Za betonske konstrukcije v jedrskih elektrarnah, ki opravljajo osnovno (biološko) zaščito pred sevanjem, se lahko uporabi težke ali goste agregate, kot so barit, limonit, magnetit in ilmenit, da se zmanjša debelino na nekaterih odsekih in doseže zahtevano oviranje sevanja.

## 4.2 Navadno armaturno jeklo

Natezna trdnost betona se giblje približno nekje od ene desetine do ene petine tlačne trdnosti betona, zato beton ne more biti zanesljiv pri prenašanju visokih nateznih napetosti. Beton in jeklo zato delujeta usklajeno, kot kaže slika 22. Poleg tega, da jeklo prevzame natezne napetosti, omogoča tudi nadzor nad obsegom in širino razpok v betonu in pomoč pri prenašanju strižnih napetosti.



Slika 22: Princip delovanja armiranega betona

Vir: D. J. Naus, 2007

## 4.3 Jeklo za prednapenjanje

Prednapenjanje je metoda armiranja (ojačanja) betona z žicami, vrvmi ali palicami visokih nateznih trdnosti v snopih. Snopi so nameščeni v predpripravljene kanale, prednapeti in nato zasidrani v predpripravljene betonski konstrukciji. Prednapeti snopi prenašajo natezne obremenitve, ki se uporabijo za vnos tlačnih napetosti v beton, kar zagotovi večjo odpornost betona na nastajanje razpok. Prednapeti sistemi se na splošno uporabljajo v kombinaciji z navadnim armaturnim jeklom. Ker se običajno armiranje šteje kot pasivno, lahko prednapeto armaturo obravnavamo kot aktivno.

Številni elementi betonskih zadrževalnih hramov jedrskih elektrarn uporabljajo prednapeto jeklo za zagotovitev primarnega prevzema nateznih obremenitev. Obstajajo tri glavne kategorije, iz katerih so sestavljeni snopi:

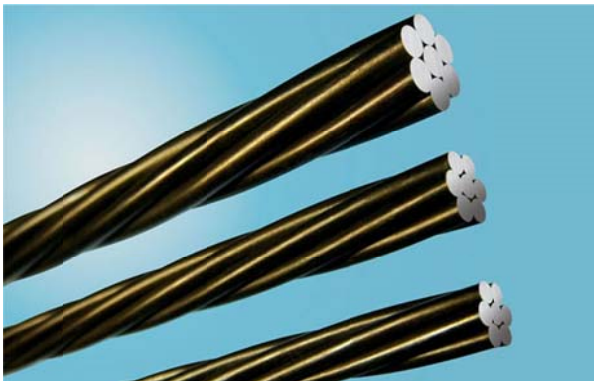
- žice



**Slika 23: Žice za prednapenjanje**

Vir: [www.pcsteelwire.com](http://www.pcsteelwire.com)

- pletene žice



**Slika 24: Pletene žice za prednapenjanje**

Vir: [www.pcsteelwire.com](http://www.pcsteelwire.com)

- palice



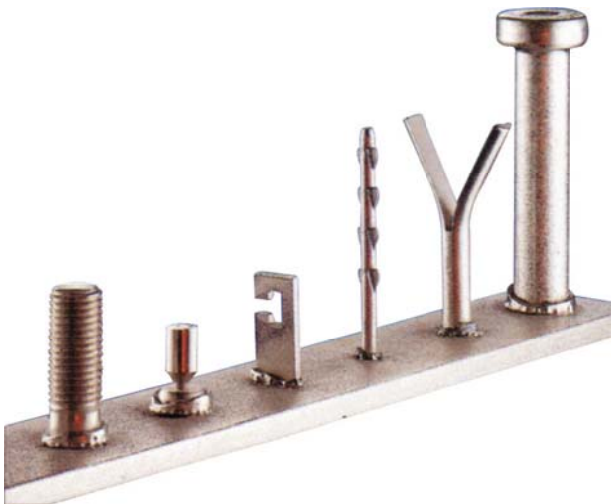
**Slika 25: Palice za prednapenjanje**

Vir: [www.pcsteelwire.com](http://www.pcsteelwire.com)

Snopi so nameščeni znotraj pripravljenih kanalov v zadrževalnem hramu, in prednapeti z ene ali obeh strani, da beton doseže zadostno trdnost. Snopi so zasidrani s klini. Kanali so zapolnjeni z voskom, protikorozijsko mastjo ali injektirano cementno pasto, ki služi kot zaščita pred korozijo jekla. Dodatna navadna jeklena armatura se uporablja za zmanjšanje vplivov krčenja in temperaturnih vplivov ter prevzem in prenos lokalnih obremenitev in obtežb.

#### 4.4 Linijska jeklena plošča

Dodatno vodotesnost armirano betonskih in prednapetih betonskih zadrževalnih hramov se zagotovi z jekleno linijsko ploščo. Sestavljena je iz jeklenih plošč debeline 13 mm, ki so med sabo varjene in sidrane v beton s čepi (Nelson ali podobno v skladu z ASTM 10.840).



**Slika 26: Čepi Nelson za sidranje pločevine v beton**

Vir: [www.deltec.fr](http://www.deltec.fr)

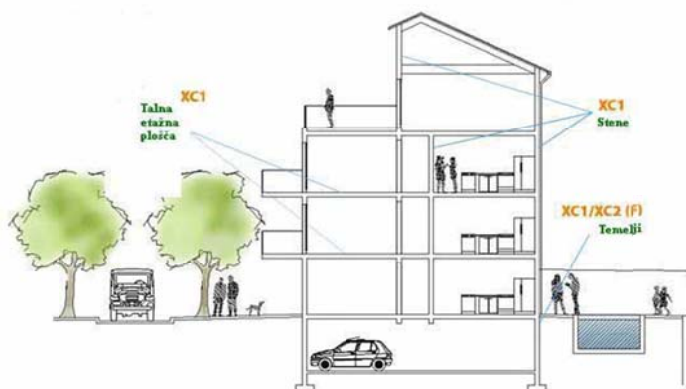
Primarna naloga linijske jeklene plošče je, da zagotavlja neprepustno oviro in del opaža za vgradnjo betona. Služi lahko tudi za pritrjevanje različnih vodov, inštalacij in opreme znotraj zadrževalnega hrama. Linijske jeklene plošče se ne upoštevata pri trdnosti celotne konstrukcije.

## 5 IZPOSTAVLJENOST ARMIRANOBETONSKIH KONSTRUKCIJ AGRESIVNIM VPLIVOM

Vsaka konstrukcija mora biti projektirana in izvedena tako, da je v projektirani življenski dobi zanesljiva, da prenaša vplive v ekonomskih okvirih med gradnjo in kasneje med uporabo objekta in da služi svojemu namenu. Že v fazi projektiranja je potrebno vedeti za kakšno vrsto objekta gre, katerim agresivnim vplivom bo izpostavljen in v kolikšni stopnji bo agresivnost nastopala. Dobi, v kateri bo konstrukcija s predpisano zanesljivostjo uporabna za predviden namen, pravimo projektirana življenska doba. To pomeni, da se ob pravilnem vzdrževanju objekta, brez obsežnejše obnove, doseže projektirano življensko dobo objekta.

Beton je od vgradnje dalje izpostavljen propadanju. Nagnjenost betona k propadanju je odvisna od vrste betona, oziroma od njegove korozijske odpornosti. Korozijska odpornost je odvisna od vrste in stopnje izpostavljenosti okolju. Slovenski standard za beton SIST EN 206-1 obravnava stopnje izpostavljenosti pri različnih vplivih okolja:

- X0 - ni nevarnosti korozije ali agresivnega delovanja okolja,
- XC1 do XC4 - korozija zaradi karbonatizacije,
- XD1 do XD3 - korozija zaradi kloridov, ki ne izvirajo iz morske vode,
- XS1 do XS3 - korozija zaradi kloridov iz morske vode,
- XF1 do XF4 - zmrzovanje/tajanje,
- XA1 do XA3 - kemično delovanje, kjer so za talno vodo karakteristične vsebnosti  $\text{SO}_4^{2-}$ , pH, agresivni  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_4^+$ , in  $\text{Mg}^{2+}$ , za zemljino pa njena kislost in vsebnost  $\text{SO}_4^{2-}$ .



Slika 27: Vpliv korozije zaradi karbonatizacije  
Vir: [www.jadranka.si](http://www.jadranka.si)



Slika 28: Vpliv korozije zaradi kloridov, ki ne izvirajo iz morske vode  
Vir: [www.jadranka.si](http://www.jadranka.si)



Slika 29: Vpliv korozije zaradi kloridov iz morske vode  
Vir: [www.jadranka.si](http://www.jadranka.si)



Slika 30: Vpliv zmrzovanja/tajanja s sredstvi za tajanje ali brez njih  
Vir: [www.jadranka.si](http://www.jadranka.si)

## 5.1 Stopnje izpostavljenosti glede na delovanje okolja

**Preglednica 7: Razredi in stopnje izpostavljenosti betona (standard SIST 1026:2008)**

Razred in stopnja izpostavljenosti ter opis okolja		Informativni primeri za določitev razreda in stopnje izpostavljenosti v RS
<b>1 Ni nevarnosti korozije</b>		
X 0	Pri nearmiranem betonu ali betonu brez vgrajenih delov: vsi razredi izpostavljenosti razen zmrzovanja/tajanja, obrabe ali kemijskega	Nearmirani elementi znotraj stavb ali popolnoma vkopani v neagresivno zemljino ali popolnoma potopljeni v neagresivno vodo, npr. Nearmirani temelji, izravnalni betoni
	Pri armiranem betonu ali betonu z vgrajenimi deli: zelo suho	Beton znotraj stavb z zelo nizko vlažnostjo zraka Armirani elementi znotraj stavb, če je relativna vlažnost v prostoru do 35 %, če ni nevarnosti zmrzovanja in kemičnega delovanja in ni zahtevana odpornost proti obrabi
<b>2 Korozija zaradi karbonatizacije</b>		
<p>Če je armirani beton ali beton z vgrajenimi deli izpostavljen zraku in vlagi.</p> <p>OPOMBA: Pogoj vlažnosti velja za stanje v zaščitenem sloju betona nad armaturo ali drugim vgrajenim kovinskim delom, v mnogih primerih pa se lahko upošteva, da stanje v zaščitenem sloju odraža pogoje v neposredni okolici. V teh primerih je lahko ustrezno razvrščanje glede na pogoje v neposredni okolici. To pa morda ne drži, če je med betonom in njegovo okolico zaporni sloj.</p>		
XC 1	Suho	Beton znotraj stavb z nizko vlažnostjo zraka Elementi v notranjosti stavb, v prostorih z običajno vlažnostjo, vključno kuhinje in kopalnice v stanovanjskih stavbah
	Trajno mokro	Beton, stalno potopljen v vodi Elementi, ki so trajno potopljeni v neagresivni vodi, npr. temelji, zgradbe v vodi
XC 2	Mokro, le redko suho	Betonske površine v dolgotrajnem stiku z vodo Mnogi temelji Popolnoma vkopani elementi v neagresivni zemljini, npr. temelji, piloti, kletni zidovi Elementi vodnih zbiralnikov ali vodohramov in posod za neagresivne tekočine

se nadaljuje ...



... nadaljevanje preglednice 7

XC 3	Zmerno vlažno	<p>Beton znotraj stavb z zmerno ali visoko vlažnostjo zraka</p> <p>Zunanji beton, zaščiten pred dežjem</p> <p>Elementi stavb, ki so stalno v stiku z zunanjim zrakom</p> <p>Elementi v notranjosti stavb, v prostorih z visoko vlažnostjo, npr. obratne kuhinje in pralnice, javna kopališča, hlevi</p> <p>Zunanji elementi stavb, zaščiteni pred dežjem, npr. zaščitene fasade, deli zunanjih stopnišč in balkonov</p> <p>Elementi inženirskih zgradb, zaščiteni pred dežjem, npr. elementi premostitvenih objektov in predorov na cestah, ki se pozimi ne solijo, ter na železnicah</p> <p>Nosilne plasti vozišča na cestah, ki se pozimi ne solijo</p>
XC 4	Izmenično mokro in suho	<p>Površine betona v stiku z vodo, ki ne sodijo v stopnjo izpostavljenosti XC2</p> <p>Zunanji elementi stavb, izpostavljeni dežju, npr. nezaščitene fasade, zunanja stopnišča, balkoni</p> <p>Prometne površine, npr. ploščadi in tlaki, izpostavljeni dežju</p> <p>Obrabne plasti vozišča na cestah, ki se pozimi ne solijo</p> <p>Elementi inženirskih zgradb, izpostavljeni dežju, npr. elementi premostitvenih objektov in predorov na železnicah in cestah, ki se pozimi ne solijo, deli HE objektov</p> <p>Elementi inženirskih objektov v območju nihanja vodne gladine, npr. rečni stebri mostov, deli HE objektov</p>

### 3 Korozija zaradi kloridov, ki ne izvirajo iz morske vode

Če je armirani beton ali beton z vgrajenimi deli v stiku z vodo, ki vsebuje kloride, vključno soli za tajanje, ki ne izvirajo iz morske vode in če ni nevarnosti zmrzovanja

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 7

XD 1	Zmerna vlažnost	<p>Betonske površine, izpostavljene kloridom, ki jih prenaša zrak</p> <p>Elementi premostitvenih objektov in predorov, izpostavljeni slanemu zraku ali ki so lahko posredno izpostavljeni delovanju slanice</p> <p>Elementi zgradb na cestah, ki so lahko posredno izpostavljeni delovanju slanice, npr. nosilne plasti vozišča na cestah, ki se pozimi solijo</p>
XD 2	Mokro, le redko suho	<p>Plavalni bazeni</p> <p>Beton, izpostavljen industrijskim vodam, ki vsebujejo kloride</p>
XD 3	Izmenično mokro in suho	<p>Deli mostov, izpostavljeni pršcu, ki vsebuje kloride</p> <p>Krovne plasti vozišč</p> <p>Plošče v parkirnih hišah</p> <p>Prometne površine, ki se pozimi solijo, npr. parkirne ploščadi, tlaki, obrabne plasti vozišča</p> <p>Navpični in vodoravni elementi, izpostavljeni neposrednemu delovanju (škropljenju) slanice:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- na premostitvenih objektih, predorih in drugih zgradbah na cestah, ki se pozimi solijo, ter na zgradbah ob njih (do 3 m nad cestiščem)</li> <li>- v parkirnih hišah</li> </ul>

#### 4 Korozija zaradi kloridov iz morske vode

Če je armirani beton ali beton z vgrajenimi deli v stiku s kloridi iz morske vode ali z zrakom, ki prenaša soli iz morske vode

XS 1	Sol v zraku, brez neposrednega stika z morsko vodo	<p>Konstrukcije blizu obale ali ob njej</p> <p>Zunanji elementi stavb in inženirskih zgradb blizu morske obale ali ob njej (v pasu do pribl. 1 km)</p>
XS 2	Trajno potopljeno	<p>Deli morskih zgradb</p> <p>Elementi stavb in inženirskih zgradb, ki so trajno in popolnoma potopljene v morje, npr. potopljene deli pristaniških zgradb in mostov</p>

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 7

XS 3	Območje plimovanja, pljuskanja in pršenja	Deli morskih zgradb Elementi stavb in inženirskih zgradb v območju plimovanja, pljuskanja in pršenja morske vode, npr. deli pristaniških zgradb in mostov, izpostavljeni tem pojavom
<b>5 Zmrzovanje/tajanje s sredstvi za tajanje ali brez njih</b>		
Če je moker beton izpostavljen znatnemu delovanju izmeničnega zmrzovanja/tajanja		
XF 1	Zmerna nasičenost z vodo brez sredstva za tajanje	Navpične betonske površine, izpostavljene dežju in zmrzovanju Navpični in več kot 10% nagnjeni zunanji elementi stavb, izpostavljeni dežju Elementi inženirskih zgradb, izpostavljeni dežju, če je stopnja nasičenosti zmerna, npr. elementi cestišča, premostitvenih objektov in predorov na cestah, ki se pozimi ne solijo, ter na železnicah, deli HE objektov Elementi inženirskih objektov v območju občasnega nihanja vodne gladine.
XF 2	Zmerna nasičenost z vodo, ki vsebuje sredstvo za tajanje	Navpične betonske površine konstrukcij na cestah, izpostavljene zmrzovanju in sredstvom za tajanje, ki se prenašajo po zraku Elementi premostitvenih objektov in drugih zgradb na cestah, ki so izpostavljeni slanemu zraku Elementi premostitvenih objektov in drugih zgradb na cestah, ki so lahko posredno izpostavljeni slanici, npr. nosilne plasti vozišča, voziščna plošča

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 7

XF 3	Močna nasičenost z vodo brez sredstva za tajanje	<p>Vodoravne betonske površine, izpostavljene dežju in zmrzovanju</p> <p>Vodoravni in manj kot 10% nagnjeni elementi zunaj stavb</p> <p>Elementi inženirskih zgradb, izpostavljeni dežju, če je stopnja nasičenosti visoka, npr. elementi cestišča, premostitvenih objektov in predorov na cestah, ki se pozimi ne solijo, ter na železnicah, deli HE objektov</p> <p>Prometne površine, ki se pozimi ne solijo, npr. obrabne plasti vozišča, parkirne ploščadi, tlaki</p> <p>Elementi inženirskih objektov v območju pogostega nihanja vodne gladine</p> <p>Elementi zgradb za odpadne vode in vodnih zbiralnikov, ki so med obratovanjem nasičeni z vodo.</p>
XF 4	Močna nasičenost z vodo, ki vsebuje sredstvo za tajanje, ali z morsko vodo	<p>Krovne plasti na cestah in mostne plošče, izpostavljene sredstvom za tajanje</p> <p>Betonske površine, izpostavljene neposrednemu pršcu, ki vsebuje sredstva za tajanje, in zmrzovanju</p> <p>Območje pljuskanja na morskih zgradbah, ki so izpostavljene zmrzovanju</p> <p>Prometne površine, ki se pozimi solijo, npr. obrabne plasti vozišča, parkirne ploščadi, tlak</p> <p>Navpični in vodoravni elementi, izpostavljeni neposrednemu delovanju (škropljenju) slanice</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- na premostitvenih objektih, predorih ter drugih zgradbah na cestah in vzdolž njih (do 3 m nad cestiščem)</li><li>- v odprtih parkirnih hišah</li></ul>

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 7

<b>6 Kemično delovanje</b>		
<p>Če je beton izpostavljen kemičnemu delovanju naravnih zemljin in talne vode, kot je navedeno v preglednici 8, je treba stopnjo izpostavljenosti določiti na spodaj navedeni način. Klasifikacija morske vode je odvisna od geografskega položaja; zato je treba upoštevati klasifikacijo, veljavno v kraju uporabe betona.</p> <p>OPOMBA: Za določitev ustreznih pogojev okolja je morda potrebna posebna študija, če</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- so mejne vrednosti zunaj preglednice 8</li><li>- so prisotne druge agresivne kemikalije</li><li>- so tla ali voda kemično onesnažena</li><li>- je hitrost vode v kombinaciji s kemičnimi snovmi iz preglednice 8 velika.</li></ul>		
XA 1	Malo agresivno kemično okolje	
XA 2	Zmerno agresivno kemično okolje	
XA 3	Močno agresivno kemično okolje	
<b>7 Obraba površine betona</b>		
<p>Če je površina betona izpostavljena mehanskim obremenitvam, je treba stopnjo izpostavljenosti določiti na naslednji način</p>		
XM 1	Zmerna obremenitev	Nosilni industrijski tlaki za vozila s pnevmatskimi kolesi
XM 2	Močna obremenitev	Nosilni industrijski tlaki za viličarje s polnimi gumijastimi kolesi Krovne plasti vozišč za lahko in srednjo prometno obremenitev Konstrukcije v hitro tekoči vodi
XM 3	Zelo močna obremenitev	Nosilni industrijski tlaki za viličarje z elastomernimi ali jeklenimi kolesi Krovne plasti vozišč za težko in zelo težko prometno obremenitev Konstrukcije v hitro tekoči vodi, ki nosi pesek

**Preglednica 8: Mejne vrednosti kemičnega delovanja zemljin in talne vode (standard SIST EN 206-1).**

Kemična karakteristika	XA 1	XA 2	XA 3
<b>Talna voda</b>			
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , mg/l	≥ 200 in ≤ 600	> 600 in ≤ 3000	> 3000 in ≤ 6000
pH	≥ 6,5 in ≤ 5,5	> 5,5 in ≤ 4,5	> 4,5 in ≤ 4,0
Agresivni CO <sub>2</sub> , mg/l	≥15 in ≤ 40	> 40 in ≤ 100	> 100 do nasičenosti
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , mg/l	≥15 in ≤ 30	> 30 in ≤ 60	> 60 in ≤ 100
Mg <sup>2+</sup> , mg/l	≥300 in ≤ 1000	> 1000 in ≤ 3000	>3000 do nasičenosti
<b>Zemljina</b>			
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , mg/l	≥ 2000 in ≤ 3000	> 3000 in ≤ 12000	> 12000 in ≤ 14000
Kislost, ml/kg	≥ 200	V praksi ne nastopa	

## 5.2 Stopnje agresivnosti okolja

**Preglednica 9: Zahtevane posebne lastnosti strjenega betona in priporočene vrednosti parametrov sestave svežega betona za posamezne stopnje izpostavljenosti (standard SIST 1026:2008.).**

Stopnja agresivnosti okolja	Stopnja izpostavljenosti po SIST EN 206-1	Posebne lastnosti betona za preverjanje izbranih parametrov sestave svežega betona			Priporočeni parametri sestave svežega betona	
		XC, XD, XS, XA	XF	XM	(v/c)	Najmanjša vsebnost cementa kg/m
I Nizka	X0				0,75	
	XC1				0,65	260
II Zmerna	XC2, XC3	PV-1			0,55	300
	XC2 + XF 1	PV-1	NOZT-100		0,55	300
III Normalna	XD1, XS1, XA1, XM1	PV-1		OO-1	0,55	320
	XD1 + XF2	PV 1	OPZT-S10		0,60 ae	300
					0,55	320

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 9

IV	Močna	XC4 XD2 XS2 XA2 XM2	PV-11		OO-2	0,50	340
		XC4 + XF3	PV-11	NOZT- 150		0,55 ae	320
						0,50	340
V	Zelo močna	XD3 XS3 XA3 XM3	PV-111		OO-3	0,45	360
		(XD2 XD3) + XF4	PV-11	OPZT- S25		0,50 ae	360
(v/c)	<p>Največje efektivno vodocementno razmerje (v/c) ki pri določeni stopnji izpostavljenosti po izkušnjah omogoča 50-letno življenjsko dobo objekta. Prekoračitev deklarirane vrednosti (v/c) za več kot 0,02 pomeni neskladnost pri kontroli proizvodnje (glej tc. 5.4.2 in preglednico 17). Če se predpostavi normalna statistična porazdelitev vrednosti v/c je <math>(v/c)_{\max} = (v/c)_m + 1,75\sigma_{v/c}</math>, kjer je <math>(v/c)_m</math> srednja vrednost, <math>\sigma_{v/c}</math> pa standardni odklon normalne porazdelitve izmerjenih vrednosti v/c. Pri <math>\sigma_{v/c} \approx 0,03</math> velja potem naslednja poenostavitev <math>(v/c)_{\max} \approx (v/c)_m + 0,05</math>.</p> <p>Postopek določitve <math>(v/c)_{\text{eff}}</math> je opisan v dodatku 3 Efektivna vsebnost vode za določitev <math>(v/c)_{\text{eff}}</math> je razlika med celotno količino vode v svežem betonu in vodo ki jo vpije agregat.</p>						
ae	(v/c) <sub>max</sub> za aerirani beton						
PV	Prodor vode iz tč. 5.5.3 (stopnje I, II in III)						
OZT	odpornost proti zmrzovanju/tajanju						
NOZT100, NOZT150	Notranja odpornost proti zmrzovanju/tajanju tč. 5.5.5 (po 100 ali 150 ciklih zmrzovanja/tanja)						
OPZT-S10	Odpornost površine proti zmrzovanju – tajanju s sredstvi za tajanje po 10 ciklih zmrzovanja – tanja tč. 5.5.6						
OPZT-S25	Odpornost površine proti zmrzovanju – tajanju s sredstvi za tajanje po 25 ciklih zmrzovanja – tanja tč. 5.5.6						
OO	Odpornost proti obrabi (1 2 3)						
*	Pri največjem zrnju agregata 22 ali 32 mm						

### 5.3 Priporočene stopnje izpostavljenosti za pomembnejše betonske konstrukcijske elemente z armaturo ali vgrajenimi kovinskimi deli

**Preglednica 10: Priporočene stopnje izpostavljenosti**

	Konstrukcijski element	Posebnosti okolja	Priporočena stopnja izpostavljenosti
1	Elementi v notranjosti stavb <sup>1)</sup>	Zelo suho (r v do 35 %), ni nevarnosti kemičnega delovanja in ni zahtevana odpornost proti obrabi	X 0
2		Suho	XC 1
3		Vlažno, na primer: kopalnice, pralnice, kuhinje, vlažne kleti	XC 3
4	Elementi v odprtih delih stavb, na primer: stebri, stene, tlaki	Zmerno vlažno	XC 3
5	Elementi stavb in inženirskih objektov <sup>2)</sup> , potopljeni v vodi, na primer: pasovni temelji, temeljne plošče, kletne stene, deli mostnih opornikov, kesoni, deli HE objektov, obloge vodnih zbiralnikov in kanalov	Talna voda ni agresivna	XC 1 ali XC 2
6		Talna voda je agresivna	XC 1 ali XC 2 + XA <sup>a)</sup>
7	Elementi stavb in inženirskih objektov, vkopani v tleh, na primer: temelji, kletne stene, piloti, deli mostnih opornikov, deli HE objektov	Zemljina ni agresivna	XC 3 ali XC 4
8		Zemljina je agresivna	XC 3, ali XC 4 + XA <sup>a)</sup>
9	Elementi stavb in inženirskih objektov blizu morske obale ali ob njej (v pasu pribl 1 km)	Izpostavljeno soli, ki jo prenaša zrak	XS 1
10	Elementi stavb in inženirskih objektov, potopljeni v morje, na primer: temelji, piloti, pilotne kape, stene in stebri opornikov	Trajno potopljeno v morje	XS 2
11	Elementi stavb in inženirskih objektov v območju plimovanja in pljuskanja morske vode, na primer: pristaniške ploščadi; stebri, stene, piloti, pilotne kape opornikov	Izpostavljeno plimovanju, pljuskanju in pršenju	XS 3
12	Navpični elementi na zunanjih površinah stavb, zaščiteni pred dežjem, na primer: zaščitene fasade, spodnja stran balkonov	Zmerno vlažno (nenasičeno z vodo)	XC 3
13	Navpični elementi na zunanjih površinah	Ni nevarnosti zmrzovanja	XC 4
14	Stavb in inženirskih objektov, izpostavljeni dežju, na primer nezaščitene fasade, parapeti balkonov	Obstaja nevarnost zmrzovanja <sup>b)</sup>	XC 4+XF 3

se nadaljuje ...



... nadaljevanje preglednice 10

15	Vodoravni ali poševni elementi izpostavljeni dežju, na primer ploščadi,	Ni nevarnosti zmrzovanja	XC 4
16	tlaki, stopnišča, strehe, deli športnih objektov, deli HE objektov	Obstaja nevarnost zmrzovanja <sup>b)</sup>	XC 4+XF 3
17	Elementi inženirskih objektov v območju nihanja vodne gladine, npr rečni stebri mostov, stebri (tudi vrhnji del temeljev) in vtoki HE objektov, obloge vodnih zbiralnikov in kanalov	Ni nevarnosti zmrzovanja	XC 4
18		Obstaja nevarnost zmrzovanja <sup>b)</sup>	XC 4+XF 3
19	Elementi stavb in inženirskih objektov izpostavljeni obrabi, npr industrijski tlaki, prometne površine (razen obrabne plasti vozišča), rečni stebri mostov, stebri in vtoki HE objektov, obloge vodnih kanalov		+ XM
20	Elementi, izpostavljeni industrijskim vodam, ki ne vsebujejo kloridov	Ni nevarnosti zmrzovanja	XC 2
21		Obstaja nevarnost zmrzovanja <sup>b)</sup>	XC 2+XF 1
22	Elementi, izpostavljeni industrijskim vodam, ki vsebujejo kloride	Ni nevarnosti zmrzovanja	XD 2
23		Obstaja nevarnost zmrzovanja <sup>b)</sup>	XD 2 +XF 4
24	Kopalni bazeni	Ni nevarnosti zmrzovanja	XD 3
25		Obstaja nevarnost zmrzovanja <sup>b)</sup>	XD 3 +XF 4
26	Elementi parkirnih hiš, izpostavljeni delovanju slanice, na primer stropne plošče, klančine, hodniki	Ni nevarnosti zmrzovanja, npr v zaprtih parkirnih hišah ali v krajih zmernih zimskih temperatur <sup>d)</sup>	XD 3
27		Obstaja nevarnost zmrzovanja <sup>b)</sup> , npr v odprtih parkirnih hišah v krajih običajnih zimskih temperatur	XD 3+XF 4
28	Parkirne ploščadi, industrijski in drugi vozni ter pohodni tlaki, izpostavljeni delovanju slanice	Ni nevarnosti zmrzovanja	XD 3
29		Obstaja nevarnost zmrzovanja <sup>b)</sup>	XD 3+XF 4
30	Elementi premostitvenih objektov na železnicah in na cestah, ki se pozimi ne solijo	Zaščiteno pred dežjem, npr vmesni oporniki, kape opornikov, stene podvozov, vmesni nosilci, prečniki, notranjost škatlastega preseka, voziščna plošča, prehodna plošča	XC 3
31		Izpostavljeno dežju, npr. krajni oporniki in krila, zunanji nosilci in zunanje stene škatlastega preseka	XC 4 <sup>d)</sup> XC 4+XF 3 <sup>e)</sup>

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 10

32	Elementi premostitvenih objektov na cestah, ki se pozimi solijo	Izpostavljeno slanemu zraku, npr. zunanji nosilci, zunanje stene škatlastega prereza, zgornji deli opornikov in kape opornikov, voziščna in konzolna plošča, prehodna plošča, plošča podvoza	XD 1 <sup>d)</sup> XD 1+XF 2 <sup>e)</sup>
33		Izpostavljeno škropljenju slanice, npr. hodniki, robni venci, stene podvozov, podpore viaduktov, nadvozov blizu voznega pasu in galerij	XD 3 <sup>d)</sup> XD 3+XF 4 <sup>e)</sup>
34		Zaščiten pred dežjem in slanico, npr. notranjost škatlastega preseka	XC 3
35	Nosilna plast vozišča na cestah, ki se pozimi <u>ne</u> solijo	Zmerna vlažnost	XC 3+XF 1 <sup>e)</sup>
36	Nosilna plast vozišča na cestah, ki se pozimi solijo	Zmerna vlažnost	XD 1+XF 2 <sup>e)</sup>
37	Obrabna plast vozišča na cestah, ki se pozimi <u>ne</u> solijo	Izpostavljeno dežju in obrabi	XC 4+XM 3 <sup>d)</sup> XC 4+XM 3+ XF 3 <sup>e)</sup>
38	Obrabna plast vozišča na cestah, ki se pozimi solijo	Izpostavljeno slanici in obrabi	XD 3+XM 3 <sup>d)</sup> XD 3+XM 3+ XF 4 <sup>e)</sup>
39	Robniki, varnostne ograje, podstavki protihrupnih ograj na cestah, ki se pozimi <u>ne</u> solijo	Izpostavljeno dežju	XC 4 <sup>d)</sup> XC 4+XF 3 <sup>e)</sup>
40	Robniki, varnostne ograje, podstavki protihrupnih ograj na cestah, ki se pozimi solijo	Izpostavljeno škropljenju slanice	XD 3 <sup>d)</sup> XD 3+XF 4 <sup>e)</sup>
41	Podporni in oporni zidovi ob železnicah in cestah, ki se pozimi <u>ne</u> solijo	Izpostavljeno dežju	XC 4 <sup>d)</sup> XC 4 +XF 3 <sup>e)</sup>
42	Podporni in oporni zidovi ob cestah, ki se pozimi solijo	Izpostavljeno škropljenju slanice (vsaj 10 m od roba vozišča)	XD 3 <sup>d)</sup> XD 3+XF 4 <sup>e)</sup>
43	Objekti za odpadne vode in čistilne naprave	Ni nevarnosti zmrzovanja	XC 1 ali XC 3
44		Obstaja nevarnost zmrzovanja	XC 2 ali XC 4 + XF 3

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 10

<p>1) Vključuje tudi industrijske zgradbe</p> <p>2) Infrastrukturni in energetske objekti</p> <p>3) Mostovi in viadukti, nadvozi in podvozi</p>	<p>a) Stopnja izpostavljenosti (XA 1, XA 2 ali XA 3) se izbere v skladu s preglednico 2 kot dodatni vpliv pri osnovni izpostavljenosti XC.</p> <p>b) Nevarnost zmrzovanja obstaja, če je v obdobju običajnih zimskih temperatur beton nasičen z vodo.</p> <p>c) Stopnja izpostavljenosti (XM 1, XM 2 ali XM3) se izbere v skladu s preglednico N.9 kot dodatni vpliv pri osnovni izpostavljenosti XC, XD ali XS.</p> <p>d) V krajih zmernih zimskih temperatur, kjer najnižja nočna temperatura ne pade pod – 5 C.</p> <p>e) V krajih običajnih zimskih temperatur.</p>
---	---

## **6 PROCESI PROPADANJA ARMIRANEGA BETONA**

Razen potresov, tornadov in drugih kratkoročnih dogodkov, se procesi propadanja armiranega betona štejejo kot neprekinjeni procesi, ki lahko povzročijo dolgoročne poškodbe na armiranem betonu. Pri skoraj vseh kemičnih in fizikalnih procesih, ki vplivajo na trajnost betonskih konstrukcij, so prevladujoči dejavniki povezani s preходом snovi znotraj por in razpok, ter prisotnost tekočin. Zato je prepustnost betona zelo pomemben parameter pri določanju trajnosti jedrskih armiranobetonskih objektov. Prepustnost je odvisna od deleža sestavin v betonu, stopnje hidratacije cementa, čistosti cementa, zrnastostne sestave agregata in vsebnosti vlage. Ne glede na mehanizem, po katerem se odvija propadanje, so posledice procesa ponavadi razpadanje materiala, kar se največkrat odrazi v obliki vidnih poškodb v strukturi materiala in v poslabšanju mehanskih lastnosti. Ponavadi se posledice najprej pokažejo na površini materialov, kjer je tudi vzpostavljen stik z okoljem, in se nato širijo v globino.

### **6.1 Procesi propadanja betona**

Procese propadanja materialov s cementnim vezivom, kot je beton, delimo glede na elemente delovanja agresije v štiri skupine:

- fizikalni procesi,
- kemijski procesi,
- biološki procesi in
- ostali dejavniki.

V nadaljevanju bodo podrobneje predstavljene prve tri skupine vplivov in sicer fizikalni, kemijski in biološki procesi propadanja.



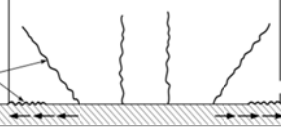

#### **6.1.1 Fizikalni procesi**

##### **6.1.1.1 Razpoke**

Rzpoke v betonu se pojavijo zaradi različnih vzrokov, med katerimi prevladujeta dva osnovna vzroka, ki sta:


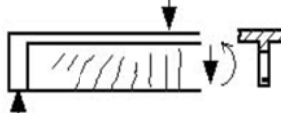
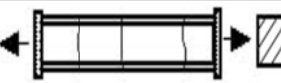
- razpoke zaradi reoloških lastnosti betona

**Preglednica 11: Prikaz in opis razpok zaradi reoloških lastnosti betona**

	Videz	Opis
Plastično krčenje		Razpoke se pojavijo po celotnem prerezu in potekajo v vseh smereh.
Plastično posedanje		Razpoke se pojavijo vzdolž armaturnih palic, pojavijo se tudi votline pod palicami.
Zgodnje toplotno krčenje		Zaradi visoke temperature med procesom hidratacije se zaradi ohlajanja elementi krčijo, zaradi česar se pojavijo razpoke.
Mrežaste razpoke		Razpoke se pojavijo na površini in so plitke.

- razpoke zaradi mehanskih preobremenitev.

**Preglednica 12: Prikaz in opis razpok zaradi mehanskih obremenitev**

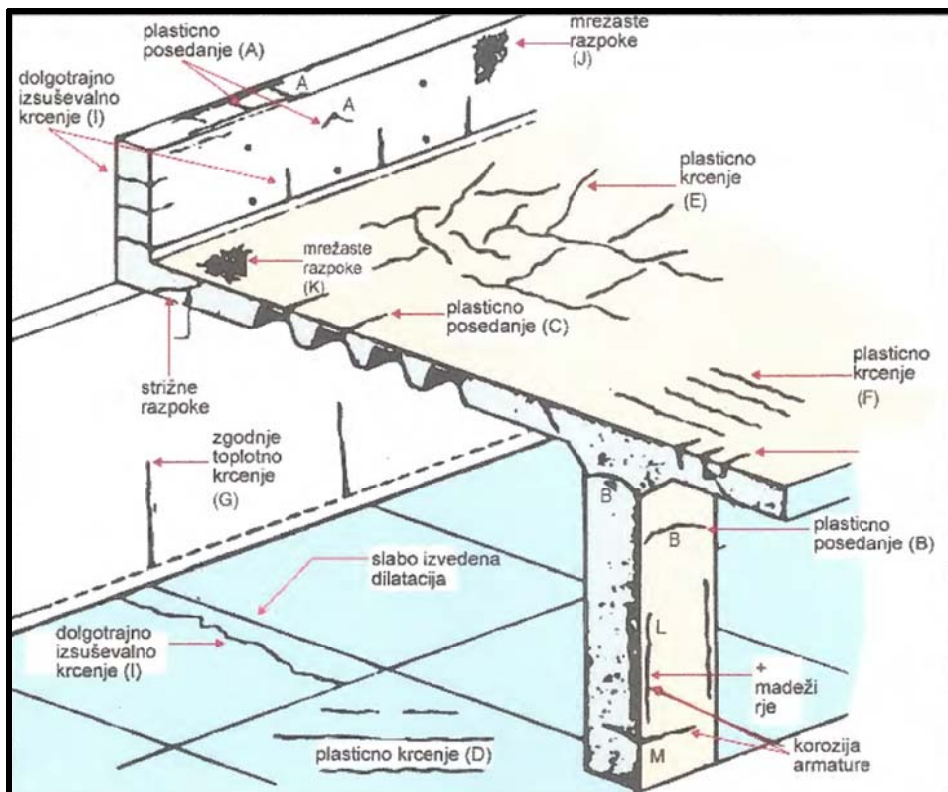
	Videz	Opis
Čisti upogib		Razpoke potekajo v smeri prečno na natezno armaturo.
Strig		Razpoke se pojavijo pojavijo ob podporah ali pri vnosu koncentrirane sile.
Čisti nateg		Razpoke potekajo po celotnem prečnem prerezu.

Najprej bodo predstavljeni vzroki nastajanja razpok, ki so povezane z lastnostmi svežega betona, načinom vgradnje in nego svežega betona.

- **Plastično krčenje** betona se pojavi v prvih urah, ko je beton še plastičen in ima majhno trdnost. Voda in zrak, ki imata manjšo gostoto kot agregat, potujeta proti površini, kjer voda (če površina ni zaščitena proti izhlapevanju) izhlapeva hitreje, kot pa potuje od notranjosti proti površini. Zaradi tega se zunanji sloj krči, notranjost pa mu zaradi večje vlažnosti to preprečuje, zato pride do površinskih razpok v širini 1-2mm, dolžini 300 – 500 mm in globini 20 – 50 mm. Razpoke se lahko omeji s primerno nego betona po vgradnji, vendar jih ni mogoče izničiti.
- **Plastično posedanje** betona se prav tako pojavi zaradi prehajanja vode in zraka zaradi manjše gostote na površje pri tem pa se agregatna zrna posedajo. Zaradi armaturnih

palic, ki preprečujejo posedanje nastanejo razpoke na površini vzdolž palic. Tipične razpoke, ki nastanejo, so ponavadi široke okoli 1 mm in segajo do armaturnih palic. Poleg tega prihaja do posedanja betona pod palico in tako se zmanjša stična ploskev med armaturo in betonom. Tako posedanje preprečimo z ustrezno sestavo in konsistenco mešanice, kar preprečuje izcejenje vode na površino.

- **Zgodnje toplotno krčenje** betona je odvisno od sproščene količine hidratacijske toplote (odvisno od vrste cementa in finosti cementa), geometrije prereza betonskega elementa, temperature ter pogojev okolja in vrste opaža. Tako imajo elementi v obliki plošče veliko površino, skozi katero odvajajo proizvedeno hidratacijsko toploto. Prečni prerezi večjih dimenzij pa lahko v notranjosti elementov razvijejo visoke temperature, zaradi katerih pride do raztezanja in pri oviranem raztezanju do tlačnih napetosti v betonu. Ko pa je dosežena najvišja temperatura v betonu, se začne prerez ohlajati in tudi krčiti. Pri oviranem krčenju tako pride do nateznih napetosti, ki poškodujejo šibki beton in nastanejo strukturne razpoke. Zaradi neenakomernega ohlajanja prereza se želi zunanji sloj skrčiti, vendar mu notranjost, ki ima višjo temperaturo to ne dopušča in tako se pojavijo razpoke na površju. Takšne poškodbe lahko preprečimo s pravilno izbiro cementa ali pa z dodajanjem mineralnih dodatkov ter z ukrepi, ki zmanjšajo hitrost sproščanja hidratacijske toplote in skupno količino le te.
- **Mrežaste razpoke** v betonu se pojavijo na izpostavljenih površinah in na površinah v stiku z opažem, kjer prihaja do spremembe lastnosti v bližini površine in kjer so ostre spremembe vlažnosti. Veliko vlogo igra vrsta opaža, saj imajo jekleni in plastični opaži gladko in neprepustno površino, ki povečuje možnost nastanka mrežastih razpok. Do mrežastih razpok zaradi spremenjenih lastnosti prihaja, ker se na površju nahaja cementna pasta z večjim deležem vode kot v notranjosti prereza (predolgo površinsko obdelovanje, glajenje itd.). Na površju se tako pojavijo napetosti zaradi hitrejšega sušenja kot v notranjosti. Mrežaste razpoke so majhne in jih lahko preprečimo z ustrezno sestavo mešanice, ustrezno zaključno obdelavo površine in ustrezno nego.



**Slika 31: Primeri različnih možnih razpok v hipotetični konstrukciji.**

Vir: Bokan in Žarnić, 2006.

Razpoke zaradi delovanja mehanskih obtežb prav tako močno vplivajo na trajnost betonskih elementov in na njihovo obnašanje. Zmanjšujejo strižno nosilnost prereza in olajšajo prehod škodljivih snovi v notranjost prereza. Do razpok pride zaradi nateznih obremenitev, ki pa jih beton ne prenaša dobro, saj znaša natezna trdnost betona okrog 10% njegove tlačne trdnosti, pri visokotrdnih betonih pa tudi samo 5%. Zato se predpostavlja, da pri armiranobetonskih elementih beton ne prevzema natega in ga v celoti nosijo armaturne palice. Razpoke, ki so vzrok zunanjega delovanja obtežbe v uporabni dobi objekta so omejene in ne smejo preseči predpisane širine, razen v izjemnih primerih, kot so: potres, udarne obremenitve itd. Nekatere omejitve so prikazane v preglednici 13 za običajne objekte, ki niso namenjene zaščiti pred nevarnimi snovmi. Za objekte jedrske elektrarne je potrebno omejiti velikosti razpok v celotni uporabni dobi objekta, kar pomeni da morajo elementi prevzeti tudi najhujše obremenitve v območju omejene širine razpok.

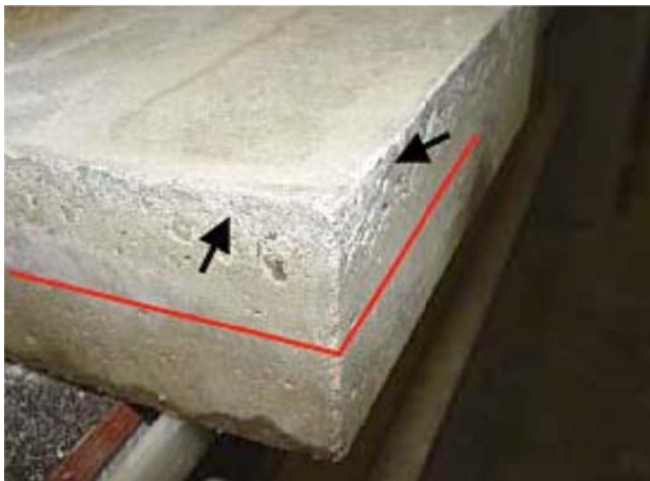
**Preglednica 13: Mejne vrednosti velikosti upogibnih razpok za konstrukcijske elemente (Bokan in Žarnič, 2006).**

Pogoji okolja	Največja dovoljena širina razpoke (mm)
ACI 224R-90 (kontrola razpok v betonskih konstrukcijah)	
Suho okolje ali zaščitna membrana	0,41
Vlažno okolje (vlažen zrak ali objekt v zemlji)	0,30
Talilne soli	0,18
Morska voda in območje pluskanja; izmenjajoče vlaženje in sušenje	0,25
ACI 318-89 (zahteve za konstrukcijski beton)	
Znotraj objekta	0,41
Zunaj objekta	0,33
ACI 350R-89 (betonske konstrukcije v okoljskem inženirstvu)	
Normalno	0,27
Ostro	0,22
CEB/FIP Model Code 1990 in Evrokod 2	
Vlažno okolje, talilne soli, morska voda	0,30

#### 6.1.1.2 Kristalizacija soli

Fizikalni vpliv soli, ki ga povzroča pretok soli raztopljenih v vodi po kapilarah skozi beton in poznejša kristalizacija s sušenjem. Postopek se ponavlja v ciklih močenja in sušenja. Slika 32 prikazuje betonsko ploščo, ki je bila izpostavljena enoletnemu cikličnemu vlaženju in sušenju v sulfatnih pogojih. Kristalizacija in ponovna kristalizacija nekaterih soli (NaCl, CaSO<sub>4</sub> in NaSO<sub>4</sub>) lahko ustvarjajo ekspanzivne napetosti, ki povzročijo poškodbe betona. Mehanizem je nekoliko podoben zmrzovanju in tajanju. Zgradbe so v stiku z nihanjem vodne gladine ali v stiku s podtalno vodo, ki vsebuje velike količine raztopljenih soli, občutljive na tovrstne poškodbe. Potrebno je paziti na betone tik nad koto terena, saj nenehno prehaja vlaga iz terena v beton preko kapilar, katera nato na površju betona izhlapeva, kar povzroči kopičenje soli v porah tik pod površjem betona. Problem kristalizacije soli lahko zmanjšamo z nizko prepustnostjo betona in uspešno izvedenimi tesnili ali barierami, ki preprečujejo dovod vlage ali poznejše izhlapevanje.





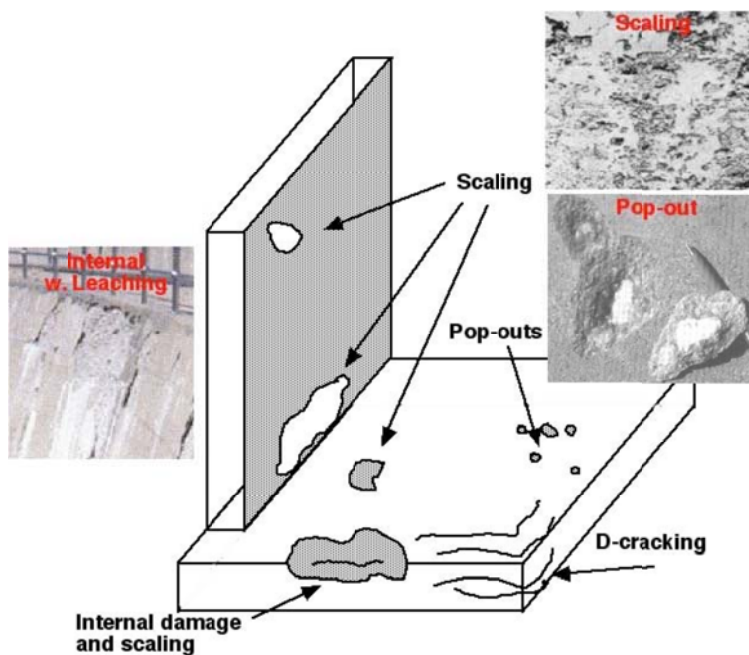
**Slika 32: Poškodba betonske plošče zaradi kristalizacije soli.**

Vir: D.J. Naus, 2007

### **6.1.1.3 Zmrzovanje in tajanje**

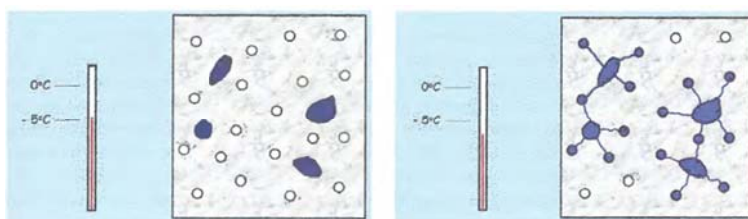
Beton, ki je nasičen ali skoraj nasičen z vodo je lahko podvržen poškodbam zaradi cikličnega zmrzovanja in tavanja. Poškodbe so posledica hidravličnega tlaka, ki se ustvarja pri zmrzovanju vode v porah poroznega materiala. Poškodbe, ki so posledica procesa zmrzovanja in tavanja se kažejo v obliki razpok ali kot luščenje zgornje plasti betona in jih prikazuje slika 33.

Poškodbe, ki nastajajo, delimo na notranje in na površinske poškodbe. Obsežnost poškodb je odvisna od stopnje izpostavljenosti elementa agresivnosti okolja in odpornosti elementa na delovanje škodljivih vplivov. Notranje poškodbe materialov s cementnim vezivom se kažejo predvsem v povečanju mikrorazpok, ki nastanejo zaradi pritiska ledu, kar vpliva na zmanjšanje karakteristik teh materialov (nosilnost, togost, deformabilnost, trajnost). Površinske poškodbe se kažejo kot luščenje površine materialov. Trajnost elementov pa je odvisna tudi od intenzivnosti luščenja. Luščenje površine je bolj škodljivo pri armiranobetonskih konstrukcijah, saj se z luščenjem tanjša zaščitni sloj betona in tako olajša vdor vode in škodljivih snovi v beton. Pričneje se kemijski procesi, ki uničujejo armaturo. Da preprečimo poškodbe betona zaradi zmrzovanja in tavanja moramo zagotoviti dovolj prostora, da se voda pri zmrzovanju razširi (razširitev volumna vode pri zmrzovanju znaša 9 %), ali pa izločiti odvečno vodo iz kapilarnih por tako, da pri naraščajočih pritiskih »pobegne« v namerno vnesene zračne pore, kot prikazuje slika 34.



Slika 33: Tipi poškodb zaradi zmrzovanja in tajanja

Vir: D.J. Naus, 2007



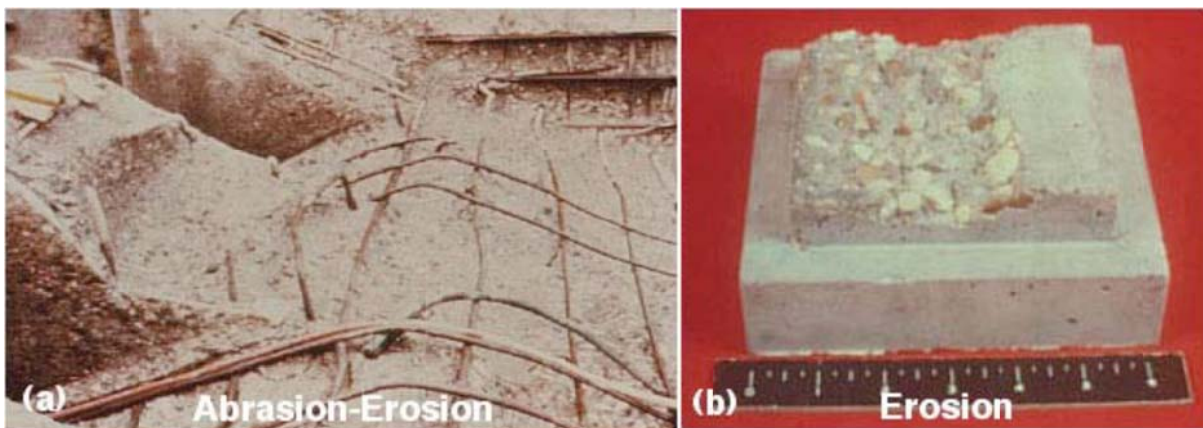
Slika 34: Shematski prikaz izločevanja vode v namerno vnesene zračne mehurčke

Vir: Bokan in Žarnić, 2006

#### 6.1.1.4 Abrazija, erozija, kavitacija

Kontinuirana izguba materiala na površini betona je lahko posledica procesov, ki jih imenujemo abrazija, erozija in kavitacija. V splošnem se abrazija nanaša na suho brušenje površine zaradi drsenja ali kotaljenja raznih teles, ki lahko delujejo na površino. Izraz erozija pomeni obrabo, ki je posledica abrazivnega delovanja tekočin (voda, veter), ki vsebujejo trdne delce v suspenziji. Erozija je najbolj značilna za objekte hidrotehničnega pomena, kot so hidroelektrarne, razni betonski cevovodi, kanali z oblogo iz betona, itd. Pri teh objektih pa se pojavljajo tudi poškodbe kot je kavitacija. Pri spremembi hitrosti tečenja vode na površini betona, se lahko na mestih z veliko hitrostjo in majhnim tlakom ustvarijo mehurčki, ki nato na mestih z manjšo hitrostjo in večjim tlakom sunkovito izginejo (eksplodirajo), kar ima za posledico velike lokalne obremenitve.

Za cementni kamen je znano, da praviloma nima visoke odpornosti na obrabo, kar še posebej velja za visoko porozen ali nizko trden cementni kamen. Z izbiro ustrezne vrste agregata, ki ima ustrezno odpornost na obrabo ter ustrezno zrnovostno sestavo (priporoča se uporaba večjega deleža grobega agregata, katerega največje zrno naj ne bi bilo večje od 25 mm) ter z dovolj nizkim v/c razmerjem, ki omogoča doseganje tlačne trdnosti betona večje od 40 MPa po 28 dneh, lahko izdelamo beton z ustrezno odpornostjo na obrabo. Sestava betonske mešanice in parametri, kot so konsistenca betona, ki omogoča ustrezno razgrnitev in zgoščevanje ter minimalni delež zraka, ki še omogoča odpornost betona na zmrzovanje/tajanje igrajo pomembno vlogo. Pomembna je tudi kvaliteta površinske plasti betona in s tem tudi obdelava površine. K višji kvaliteti površine betona pripomore podaljšano zaglajevanje površine svežega betona, da se odstani vsa voda, ki se izcedi na površino med zgoščevanjem. Odpornost na obrabo pa lahko povečamo tudi z uporabo superplastifikatorja ter mineralnih dodatkov, kot je mikrosilika, ki zmanjšajo nevarnost izcejanja vode iz betona ter povečajo trdnost in zmanjšajo prepustnost cementnega kamna. Betoni visoke trdnosti in nizke poroznosti pa niso nujno tudi odporni na obremenitve zaradi kavitacije. Poleg vseh naštetih ukrepov, ki zadoščajo za preprečitev obrabe zaradi abrazije in erozije je potrebno za preprečitev poškodb zaradi kavitacije posvetiti dodatno pozornost predvsem dobremu stiku med agregatnimi zrnji in cementnim kamnom, še posebej pa je pomembno, da odstranimo vzroke za pojav kavitacije, ne gladke površine in nenadne spremembe v naklonih.



Slika 35: Abrazija – erozija betona.

Vir: D.J. Naus, 2007

#### 6.1.1.5 Vpliv temperaturne izpostavljenosti

Pri povišani temperaturni izpostavljenosti portland cementne paste prihaja do fizikalnih in kemičnih sprememb, ki vplivajo na mehanske lastnosti betona, krčenje betona in lezenje.

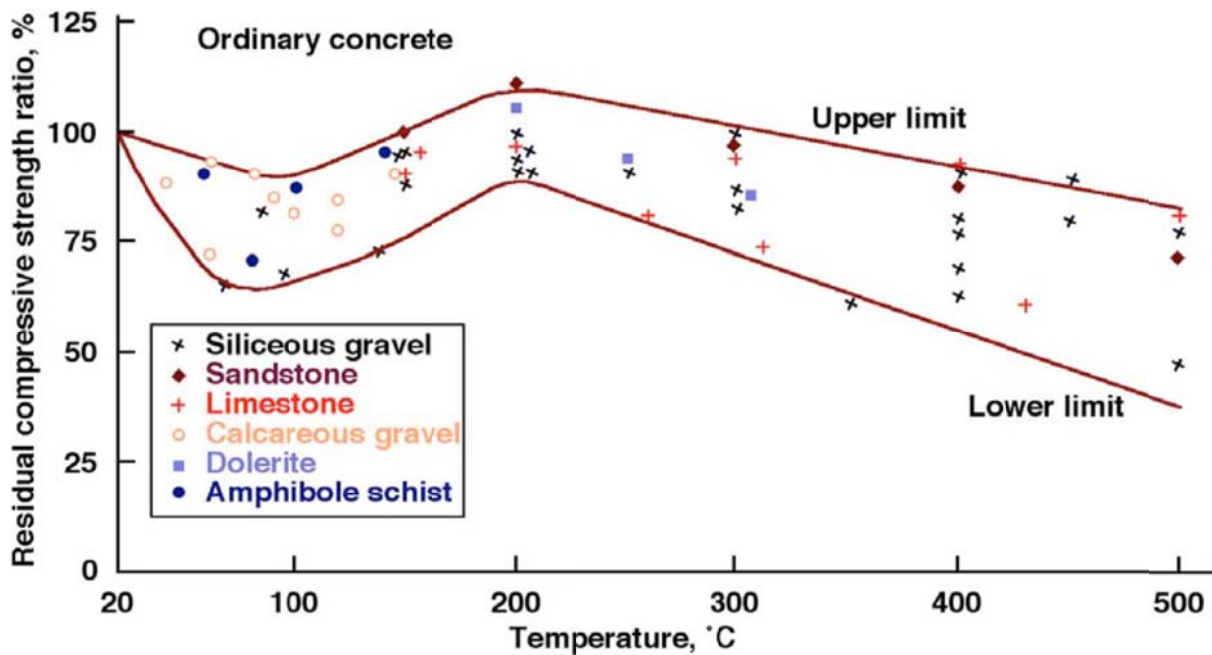
Procesi zaradi povišane temperaturne izpostavljenosti v cementnem kamnu se začnejo že pri temperaturah nižjih od 100°C. Pri teh temperaturah se spremeni struktura C-S-H faze. Prihaja do omejenega razpada produktov hidratacije cementa zaradi osvoboditve kemijsko vezane vode. Zaradi sušenja vzorca se zniža ločilni pritisk vodnih molekul med sosednjimi delci C-S-H faze in se poveča njena površinska energija. Kot je zapisal Wittmann (1977), so bili opisani fenomeni v obliki zmanjšanja specifične površine registrirani že pri 50°C. Ker prihaja do zgostitve strukture C-S-H, narašča tudi trdnost cementnega kamna. Rezultati diferenčne termične analize (DTA) kažejo, da pri temperaturah do 100°C ne nastajajo novi produkti hidratacije. Pri okoli 100°C se izloči večina izparljive vode iz betona, pri 300°C pa se izloči tudi medstojna voda v C-S-H fazi in tudi del kemijsko vezane vode iz C-S-H faze in sulfoaluminat hidratov. Pri 500°C začne razpadati kalcijev hidroksid ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) na kalcijev oksid in vodo, pri okrog 780°C pa se začne razpad kalcijevega karbonata ( $\text{CaCO}_3$ ) na CaO in  $\text{CO}_2$ . Razpad  $\text{CaCO}_3$  se dogaja pri enaki temperaturi, kot preoblikovalne reakcije C-S-H faze. Pri temperaturi 900°C C-S-H faza popolno razpade.

Izgubo tlačne trdnosti lahko razdelimo na tri temperaturna območja:

- v območju od 20°C do 400°C normalni betoni (tlačne trdnosti <50MPa) izgubijo le približno 15% trdnosti, medtem ko betoni višje trdnosti (tlačne trdnosti 80 – 100 MPa) trdnost ohranijo,
- v območju od 400°C do 800°C betoni izgubijo večino svoje trdnosti. Zmanjšanje trdnosti je še posebno izrazito v območju nad 600°C,
- v območju nad 800°C ostane le še majhen delež trdnosti betona.

Slika 36 prikazuje vpliv temperaturne izpostavljenosti na preostalo tlačno trdnost betonov z različnimi agregati, preizkušanih na tlačno trdnost pri sobni temperaturi po izpostavljenosti temperaturnim vplivom.

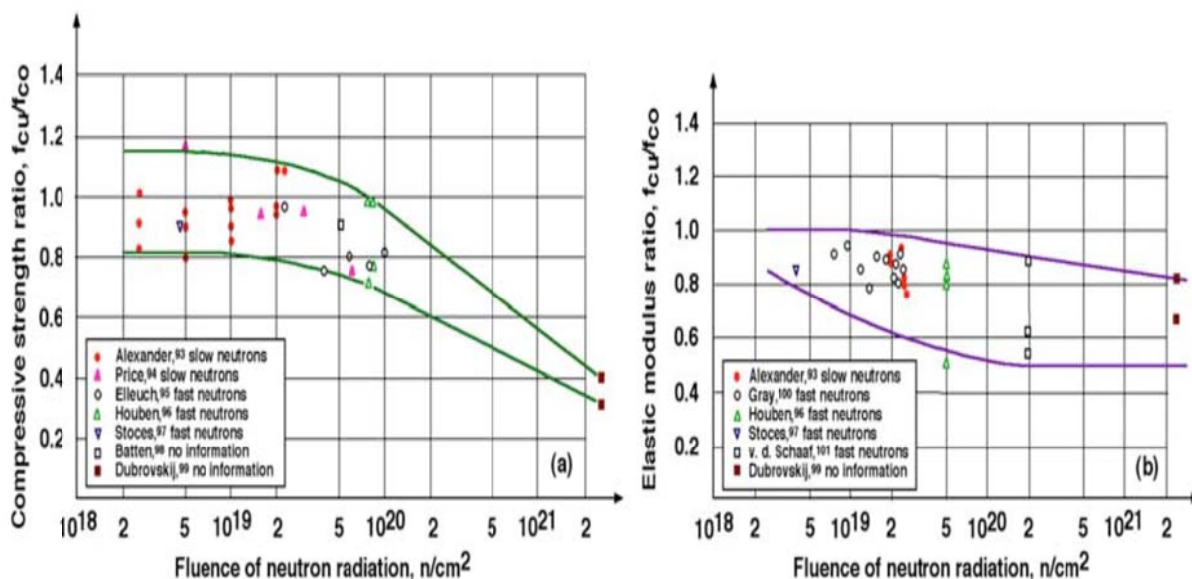
Ker betonske konstrukcije na splošno presegajo konstrukcijske zahteve (so predimenzionirane), se znižanje tlačne trdnosti betona zaradi temperaturne izpostavljenosti do 300°C pogosto lahko tolerira. Pri cikličnem izpostavljanju pa so lahko škodljive že nižje temperature (npr. 65°C), in vplivajo na zmanjšanje tlačne trdnosti, natezne trdnosti in elastičnega modula. Pri višjih temperaturnih ciklih pa so posledice seveda še večje.



Slika 36: Vpliv temperature na preostalo tlačno trdnost betona.  
Vir. D.J. Naus, 2007

#### 6.1.1.6 Sevanje

Sevanja v obliki hitrih in termičnih nevtronov, ki jih oddaja sredica reaktorja ali gama žarki, lahko vplivajo na beton. Spremembe lastnosti betona zaradi sevanja so odvisne od obnašanja agregata v betonu, ki je lahko podvržen spremembi volumna pri izpostavljenosti sevanju. Hitri nevtroni so predvsem odgovorni za precejšno rast volumna, ki jo povzročajo atomski premiki, izmerjeni pri nekaterih vrstah agregatov. Kremenovi agregati, ki vsebujejo kristale s kovalentnimi vezmi, so lahko bolj podvrženi vplivu sevanja, kot apnenčasti agregati, ki vsebujejo kristale z ionskimi vezmi. Poleg tega, ko je jedrsko sevanje oslabljeno ali absorbirano v beton, se skoraj vse absorbirano sevanje pretvori v toploto. Jedrsko ogretje se pojavi kot posledica energije vnesene v beton kot interakcija nevtronov ali gama sevanja z molekulami v betonu. Proizvedena toplota ima lahko škodljiv vpliv na fizikalne, mehanske in jedrske lastnosti betona. Dolgotrajna izpostavljenost betona sevanju lahko privede do zmanjšanja natezne in tlačne trdnosti ter modula elastičnosti. Slika 37 prikazuje povzetek vplivov sevanja nevtronov na tlačno trdnost in elastični modul betona.



Slika 37. Vpliv nevtronskega sevanja na tlačno trdnost betona in modul elastičnosti.

Vir: D.J. Naus, 2007

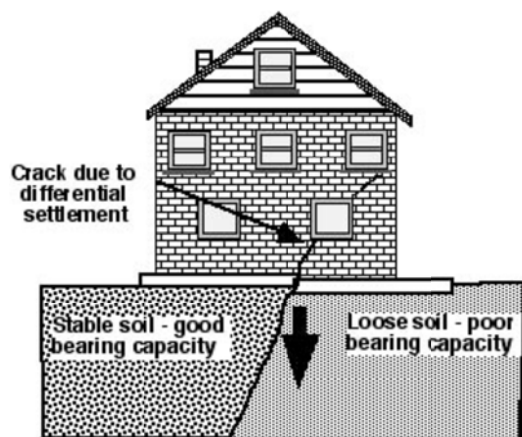
#### 6.1.1.7 Utrujenje / vibracije

Betonske konstrukcije izpostavljene nihanju obtežbe, temperature ali vlage, so lahko poškodovane zaradi utrujenosti. Poškodbe zaradi utrujenosti se pokažejo kot mikrorazpoke v cementnem kamnu, agregatu in/ali armaturnemu jeklu. Ob razbremenitvi ali nadaljni obremenitvi, se te razpoke širijo v širše in globlje razpoke, katere lahko izpostavijo beton in jeklo škodljivemu okolju ali pa privedejo do večjih deformacij.

#### 6.1.1.8 Posedanje

Vse zgradbe so nagnjene k posedanju med gradnjo in v času uporabe. Posedanje je lahko vzrok nepravilnosti pri projektiranju temeljev, bodisi zaradi nepravilne predpostavke o lastnostih zemljin in kamnin pod zgradbo, ali napake pri projektiranju elementov, kot je npr. kupola jedrskega reaktorja. Nasplošno se večina posedka izvrši v prvih mesecih po gradnji in postane zanemarljivo po tem obdobju.

Enakomerno posedanje običajno ne povzroči poškodb, čeprav prekomerno posedanje lahko povzroči poškodbe ali neskladje s povezovalnimi elementi ali zgradbami. Razlika v posedkih je bolj zaskrbljajoča, saj lahko povzroči neujemanje opreme in prevelike napetosti v zgradbi (npr. pokanje, kot je prikazano na sliki 38). Velikost posedka je odvisna od fizikalnih lastnosti tal, na katerih temeljimo. Velikost posedka se lahko giblje od minimalnega (temeljenje na skali) do velikega posedka (temeljenje na zelo stisljivi zemljini).



Slika 38: Primer razpokanja stavbe zaradi diferencialnih posedkov.

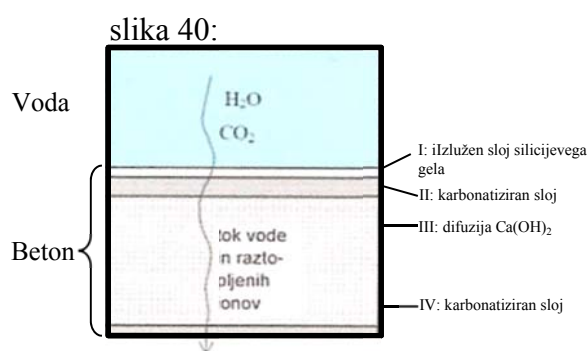
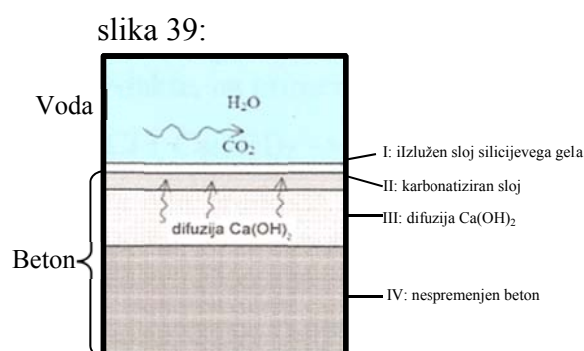
Vir: D.J. Naus, 2007

## 6.1.2 Kemični procesi

Kemični napad povzroča spremembo armiranega betona zaradi reakcije s cementnim kamnom, grobim agregatom ali jekleno armaturo. Kemičnim vplivom je ponavadi izpostavljena površina betonske konstrukcije, razen v prisotnosti razpok in/ali dolgotrajne izpostavljenosti delovanju agresivnega okolja. Glavni vzroki za kemični vpliv na propadanje armirano-betonskih konstrukcij so:

- hidroliza komponent cementnega kamna z mehko vodo,
- izmenjava kationov pri reakcijah med agresivnimi tekočinami in cementnim kamnom,
- reakcije, ki povzročajo ekspandiranje snovi v betonu in
- vplivi alkalno-agregatnih procesov.

### 6.1.2.1 Hidroliza komponent cementnega kamna z mehko vodo in izluževanje



Slika 39: Konceptualni model izluževanja na prosti površini betona.

Vir: Bokan in Žarnić, 2006

Slika 40: Konceptualni model izluževanja zaradi homogenega pronicanja vode skozi beton

Vir: Bokan in Žarnić, 2006

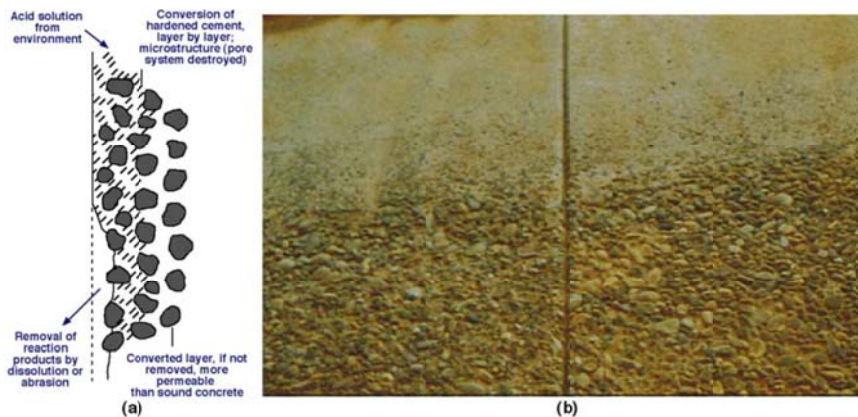
Proces, ki mu pravimo izluževanje, poteka v materialih s cementnim vezivom, kot transport ionov iz notranjosti materiala proti površini skozi pore in nato v okolico materiala. Najprej se v vodi, ki prodira v material, raztopijo trdne komponente cementnega kamna, nato se transportirajo iz materiala v okolico, z difuzijo zaradi razlik v koncentracijah ali s konvekcijo/advekcijo zaradi tečenja/pronicanja vode skozi material zaradi razlik v tlakih. Majhne količine kloridov, sulfatov in bikarbonatov kalcija in magnezija najdemo v podtalnicah, jezerih in rekah. Take vode imenujemo trda voda, ki praviloma ne napada produktov hidratacije cementa. Najbolj nevarne so vode, ki vsebujejo malo ali nič kalcijevih ionov, kot so deževnica, raztaljeni sneg in led. Take vode imenujemo čista in mehka voda. Ko mehke vode pridejo v stik s cementnim kamnom začnejo raztapljati produkte hidratacije, ki vsebujejo kalcij, dokler ne dosežejo kemijskega ravnotežja. Ko se ravnotežje vzpostavi je nadaljna hidroliza produktov hidratacije zaustavljena. V primeru tekoče vode (slika 39) ali pronicanja pod pritiskom (slika 40), se kontaktna raztopina ves čas redči in tako so zagotovljeni pogoji za kontinuirano hidrolizo produktov hidratacije. Eden od topnih produktov je kalcijev hidroksid, ki je zaradi svoje relativno velike topnosti v čisti vodi (1230 mg/l) najbolj občutljiv na hidrolizo. Hidroliza cementnega kamna teoretično poteka vse do takrat, ko se iz cementnega kamna izluži večina kalcijevega hidroksida. V nadaljevanju se prične razgradnja ostalih komponent cementnega kamna (predvsem C-S-H faze). V skrajnem primeru ostaneta v cementnem kamnu samo silicijev in aluminijev gel, ki imata zelo majhno trdnost. Pri procesu izluževanja se poveča poroznost cementnega kamna in tako tudi njegova prepustnost. Močno se lahko istočasno zmanjša tudi njegova tlačna trdnost in modul elastičnosti. Rezultati, ki jih lahko zasledimo v različni literaturi glede vpliva izluževanja na tlačno trdnost so različni: pri 20% izluženega kalcijevega hidroksida so bili zabeleženi padci tlačne trdnosti med 5% in 30%, pri 40% pa med 20% in 60%. Za 60% in 80% izluženega kalcijevega hidroksida pa so bili zabeleženi padci tlačne trdnosti za 60% oziroma 80%.

#### **6.1.2.2 Reakcije, pri katerih pride do izmenjavanja kationov**

Reakcije, ki potekajo na podlagi izmenjavanja kationov se v cementnem kamnu pojavijo med agresivnimi kemičnimi raztopinami in komponentami portland cementnega kamna. Pri teh reakcijah pride do propadanja cementnega kamna, zaradi česar nastane zrahljana struktura in se poveča prepustnost, s tem se tudi zmanjša trdnost korodiranega betona. Takšne vrste reakcij se pojavijo pri betonih, ki so v stiku z mineralnimi vodami, kislinami, raztopinami



solu, pa tudi z zelo močnimi bazami. Pri teh reakcijah je najbolj znana karbonatizacija betona, ki je posledica reagiranja  $\text{CO}_2$  iz zraka s kalcijevim hidroksidom v betonu. Posledica teh reakcij je zmanjšanje alkalnosti ter trdnosti in togosti betona, pa tudi izboljšanje pogojev za potekanje drugih procesov propadanja. Tovrstne procese propadanja lahko preprečimo z uporabo betonov višjih gostot in z ustreznimi površinskimi premazi.



**Slika 41: Površinske poškodbe zaradi napada kislin: (a)mehanizem, (b)primer kislinskega napada na betonsko steno.**

Vir: D.J. Naus, 2007

### 6.1.2.3 Reakcije, ki povzročajo ekspandiranje snovi v betonu

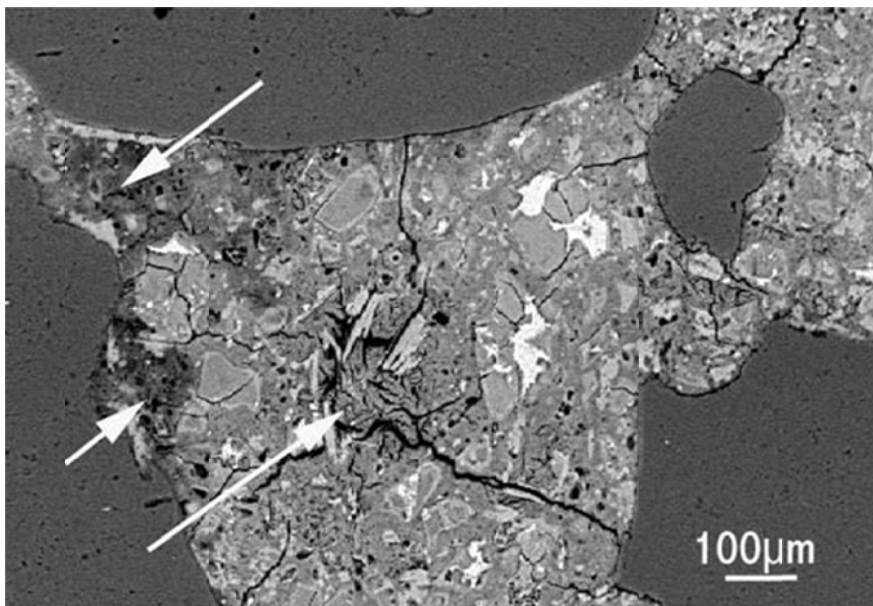
#### 6.1.2.3.1 Zunanji sulfatni napad

Najbolj običajna vrsta sulfatnega napada je zunanji sulfatni napad. Ponavadi se pojavi, če vode, ki vsebujejo raztopljene sulfate, prodirajo v cementni kamen. Večina zemljin vsebuje sulfate v obliki gipsa ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), ki so sicer v majhnih količinah (0,01% do 0,05%) praviloma neškodljivi za beton. Koncentracije sulfatov v podtalnicah so odvisne od prisotnosti magnezijevega, natrijevega in kalijevega sulfata. Amonijev sulfat najdemo v kmetijskih zemljiščih in v bližnjih vodah. Ostali viri sulfatov, ki tudi povzročajo sulfatni napad so:

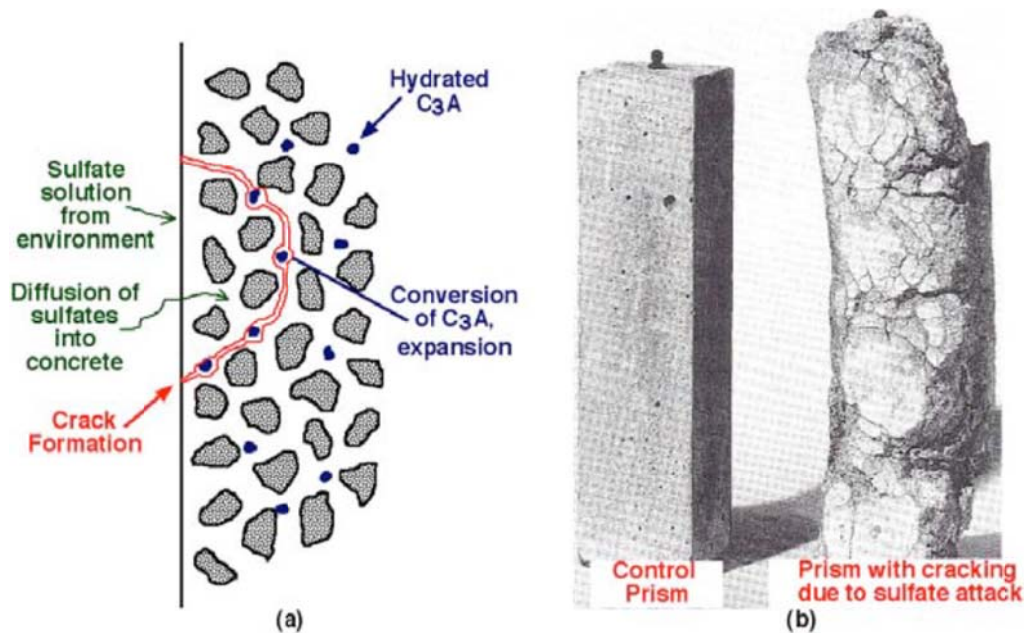
- morska voda,
- oksidacija sulfidnih mineralov v glinah v stiku s cementnim kamnom - rezultat reakcije je žveplena kislina, ki reagira s cementnim kamnom (to vrsto sulfatnega napada so zasledili tudi v Sloveniji, pri gradnji tunelov v sivici in karbonskih skrilavcih, ki vsebujejo pirit),
- delovanje bakterij v kanalizaciji - anaerobne bakterije proizvajajo žveplov dioksid, ki se raztoplja v vodi in potem oksidira v žvepleno kislino.

Kot rezultat reakcije med produkti hidratacije cementa in sulfatnimi ioni iz zunanjega vira ima lahko propadanje cementnega kamna dve obliki, ki sta bistveno različni. Proces propadanja, ki prevlada v posameznem primeru, je odvisen od koncentracije in izvora sulfatnih ionov ter od sestave cementnega kamna. Sulfatni napad se lahko izraža z ekspanzijo in oblikovanjem razpok v cementnem kamnu. Razpokanost cementnega kamna poveča njegovo prepustnost in agresivne vode lahko vstopajo mnogo lažje v njegovo strukturo, kar pa tudi pospeši propadanje cementnega kamna. Sulfatni napad se istočasno izraža kot izguba trdnosti in mase, zaradi izgube kohezivnosti/vezi med produkti hidratacije.

Sulfatnemu napadu v cementnem kamnu so podvrženi kalcijev hidroksid in faze z aluminijem (etringit, monosulfat). Po končani hidrataciji čistega portland cementa, ki ima delež  $C_3A$  večji od 5%, bo cementni kamen vseboval večino aluminija v obliki monosulfat hidrata,  $C_3A \cdot CS \cdot H_{18}$ . V primeru deleža  $C_3A$  večjega od 8%, pa produkti hidratacije vsebujejo tudi  $C_3A \cdot CH \cdot H_{18}$ . Zaradi prisotnosti kalcijevega hidroksida v cementnem kamnu se zaradi prisotnosti sulfatnih ionov preoblikujeta obe fazi, ki vsebujeta aluminij v visoko-sulfatno obliko (etringit,  $C_3A_3CS \cdot H_{32}$ ). Ekspanzija v cementnem kamnu zaradi sulfatnega napada je povezana z oblikovanjem etringita.



**Slika 42: Sulfatni napad na beton. Etringit (puščice) je nadomestil del C-S-H faze v cementnem kamnu**  
Vir: [www.understanding-cement.com/sulfate.html](http://www.understanding-cement.com/sulfate.html)



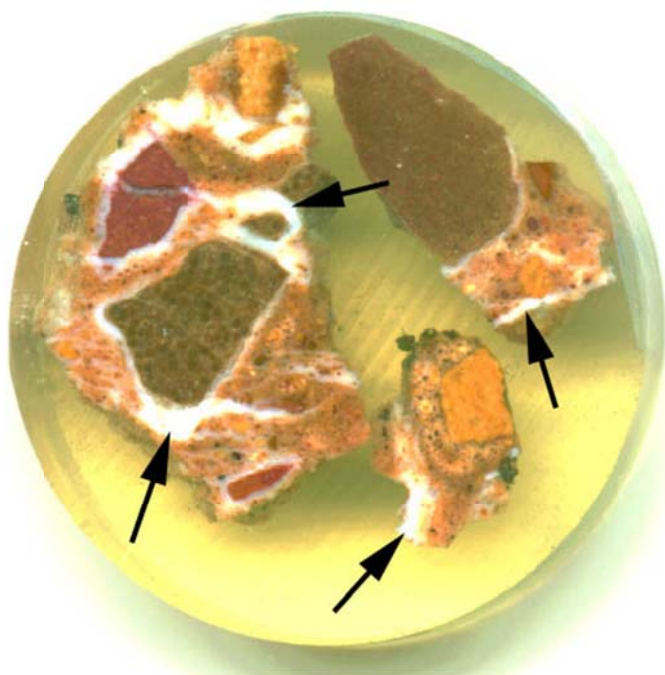
Slika 43: Razpoke v betonu zaradi sulfatnega napada: (a)mehanizem, (b)primer konkretnih razpok zaradi sulfatnega napada.

Vir: D.J. Naus, 2007.

Ekspanzijo prav tako povzroča oblikovanje gipsa, kot rezultat izmenjave kationov. Pri procesu propadanja cementnega kamna z oblikovanjem gipsa najprej pride do zmanjšanja pH vrednosti sistema in izgube njegove togosti in trdnosti. Temu sledi ekspanzija in razpokanje, na koncu pa se cementni kamen preoblikuje v kašasto ali nepovezano maso.

#### 6.1.2.3.2 Taumazitna oblika sulfatnega napada

Taumazitna oblika sulfatnega napada se pojavi ob prisotnosti sulfatov in karbonatov. Vir sulfatov je ponavadi enak, kot pri zunanjem sulfatnem napadu, karbonati pa praviloma izhajajo iz apnenčevih agregatov, še posebej iz apnenčeve moke, ki se dodaja cementnemu vezivu. Oblikovanje taumazitne oblike sulfatnega napada se pojavlja tako v maltah kot v betonih. Pri tej obliki napada pride do razpada produktov hidratacije, predvsem kalcijevega hidroksida in C-S-H faze. Oblikovanje taumazita obsežno oslabi material s cementnim vezivom, ker prav C-S-H faza zagotavlja visoko trdnost cementnega kamna in s tem tudi materialov s cementnim vezivom. Oblikovanje taumazita praviloma poteka pri nizkih temperaturah, med 4 in 10°C. Med oblikovanjem spreminja cementni kamen v prhek material. Za oblikovanje taumazita sta tako potrebna nizka temperatura in stalen vir dodatne vode. Ker za oblikovanje taumazita ni potreben aluminij ampak samo zadostna ponudba sulfatov in karbonatov, se lahko oblikuje tako dolgo, dokler je na razpolago C-S-H faza, kar pomeni, da tudi uporaba sulfatno odpornega cementa ne more preprečiti te oblike sulfatnega napada .



**Slika 44: Taumazit okoli grobih zrn agregata in v razpokah.**

Vir: [www.understanding-cement.com/sulfate.html](http://www.understanding-cement.com/sulfate.html)

#### **6.1.2.3.3 Zapoznelo oblikovanje etringita**

Primer notranjega sulfatnega napada je tudi zapoznelo oblikovanje etringita, saj je vir sulfatov v samem cementnem kamnu. Ponavadi se pojavlja pri povišani temperaturi negovanja cementnega kamna. Pojavi se v primerih, pri katerih je beton negovan z vodno paro, lahko pa se pojavi tudi v masivnih betonskih elementih, kjer hidratacijska toplota povzroča visoke temperature znotraj betonskih elementov. Etringit preide v nestabilno fazo pri 65°C, in se pri višjih temperaturah razgradi. Sulfatne ione, ki pri tem nastanejo, absorbira C-S-H faza, ki jih pozneje med uporabo objekta desorbira in ponovno se tvori etringit. Ponovno tvorjenje etringita povzroči ekspanzijo in razpoke v cementnem kamnu. Pogoj, ki je potreben za to obliko sulfatnega napada je poleg visoke temperature, še stalna zasičenost z vodo po končani negi.



**Slika 45: Razpoke v betonu zaradi zapoznelega oblikovanja etringita.**  
Vir: [www.fhwa.dot.gov/publications/transporter/04jul/index.cfm#adv](http://www.fhwa.dot.gov/publications/transporter/04jul/index.cfm#adv)

#### **6.1.2.4 Alkalno-agregatna reakcija (ASR)**

Alkalno-agregatna reakcija nastane med alkalijami v cementnem kamnu in sestavinami agregatnih zrn v strjenem betonu. Največkrat sta obravnavani:

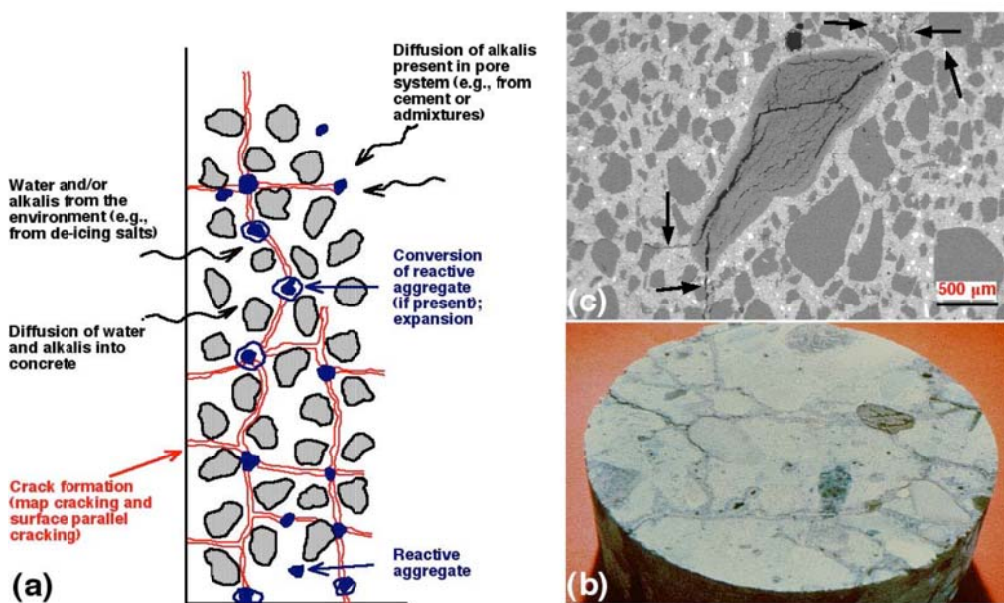
- alkalno - silikatna in
- alkalno - karbonatna (dolomitna) reakcija.

Poškodbe zaradi alkalno agregatne reakcije se pokažejo šele več let po končani gradnji, saj v obeh primerih potekajo procesi zelo počasi. Zaradi ekspanzivnih produktov reakcije pride do oblikovanja razpok in s tem do izgube trdnosti in padca modula elastičnosti betona. Beton velikokrat popolnoma razpade, zato tega procesa nikakor ne smemo zanemariti.

Alkalno-silikatne reakcije lahko ob prisotnosti hidroksilnih in alkalno-kovinskih ionov (natrijevih in kalijevih) oblikujejo alkalno silikatni gel različne kemijske sestave, kot prikazuje slika 46. Najprej se porušijo silikatne strukture agregata s strani hidroksilnih ionov, nato pa sledi absorbcija alkalno-kovinskih ionov na površino produktov reakcije. Ob stiku alkalno-silikatnega gela z vodo le ta vsrka relativno veliko količine vode zaradi osmoze in nabrekne. Pojavi se hidravlični pritisk, zaradi katerega pride do ekspanzije in razpokanja

agregata, cementnega kamna, ki obdaja agregat in posledično betona v celoti. Za alkalno-silikatno reakcijo v betonu morajo biti izpolnjeni trije pogoji:

- agregat mora vsebovati reaktivno obliko  $\text{SiO}_2$ ,
- porena raztopina v betonu mora biti visoko alkalna,
- na razpolago mora biti dovolj vlage .



Slika 46: Razpokanje betona zaradi ASR:(a)mehanizem (b)prikaz gela, ki povzroča širjenje razpok (c)poliran del betona prikazuje razpoke, ki jih povzroča širjenje agregata.

Vir: D.J. Naus, 2007



Slika 47: Poškodba objekta zaradi ASR

Vir: [www.cement.org/tech/cct\\_dur\\_AAR.asp](http://www.cement.org/tech/cct_dur_AAR.asp)

Alkalno-dolomitna reakcija ni pogost pojav, saj dolomitni agregati, ki so vzrok za tovrstne reakcije, ponavadi ne izpolnjujejo zahtev glede trdnosti. Dolomitni agregati, ki reagirajo, vsebujejo velike dolomitne kristale, obdane s fino-zrnato matrico iz kalcita in gline. Pri alkalno-dolomitni reakciji so dolomitni minerali napadeni s strani alkalnih in hidroksilnih ionov v porni raztopini. Ker je alkalno-dolomitna reakcija ekspanzivna, povzroča oblikovanje razpok v betonu.

Agregati, ki so podvrženi alkalno-silikatnim ali alkalno-dolomitnim reakcijam, niso primerni za izdelavo betona. Zmanjšanje nevarnosti za nastanek alkalno-agregatne reakcije se lahko doseže z uporabo nizko alkalnih cementov ter z zamenjavo dela cementa z žlindro, elektrofiltrskim pepelom ali mikrosiliko. Z ustreznimi metodami preiskav se lahko izdelava ocena nevarnosti pojava alkalno-agregatne reakcije.

### **6.1.3 Biološki procesi**

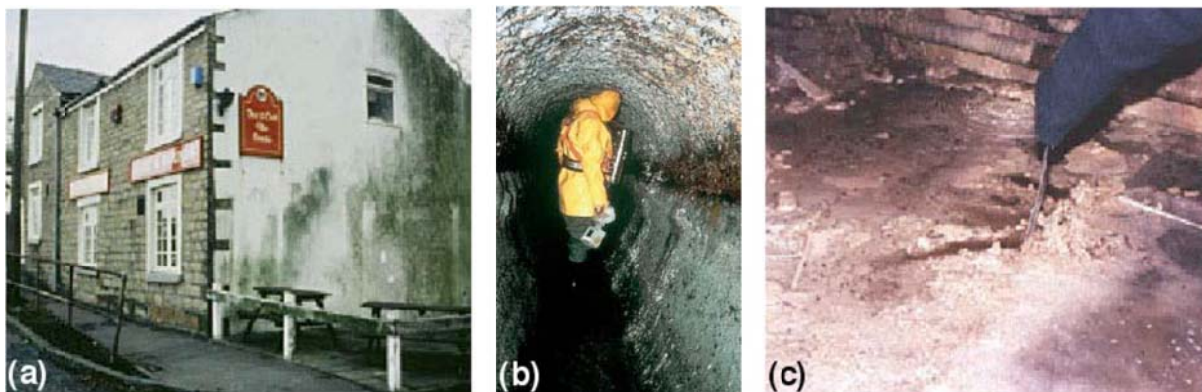
#### **6.1.3.1 Biodegradacija**

Betonske konstrukcije, na katerih se pričnejo razvijati kolonije alg, lišajev in pozneje tudi mahov, so običajno bile podvržene procesu karbonatizacije, zaradi katere se zmanjša alkalnost samega betona. Zato so kolonije ponavadi pokazatelj znižane alkalnosti betona zaradi karbonatizacije in povečane poroznosti površine betona zaradi izpiranja produktov karbonatizacije z dežjem ali vodo. Poleg tega zadržujejo na površini betona vlago in s tem povzročajo, da so pore na površini betona zasičene z vodo tudi v relativno suhem okolju, kar lahko pripelje do poškodb v primeru zmrzovanja. Nekatere vrste alg proizvajajo škodljive kisline, ki razkrajajo cementni kamen površinskega sloja betona. Podlaga, ki nastane z razmnoževanjem kolonij alg in lišajev, predstavlja dobro podlago za rast mahov in večjih rastlin, ki povzročijo nevarnejše poškodbe betona (večanje razpok, krušenje betona, itd. ).

Na obstojnost betona imajo škodljiv vpliv tudi nekatere bakterije, ki s svojim delovanjem pretvarjajo neškodljive kemikalije v kisline ali druge sestavine, ki povzročajo hitro propadanje betona. Primer agresivnega delovanja bakterij je kanalizacijski sistem. Med razgrajevanjem organskih sestavin in bakteriološko redukcijo sulfidov in sulfatov v anaerobnih pogojih lahko povzroči nastajanje vodikovega sulfida. Vodikov sulfid, v aerobnih pogojih bakterija *Thiobacillus concretivorus* oksidira in pri tem nastane žveplena kislina, ki

lahko napade beton. Mulj v kanalizacijskih ceveh omogoča anaerobne, kot tudi aerobne pogoje in je zato idealno mikrookolje za tovrsten proces.

Bakterije pretvorijo minerale v zemlji, ki vsebujejo sulfate ali sulfide ter proizvedejo kislinske produkte in visoke koncentracije sulfatov, kar zelo poveča nevarnost sulfatnega napada z oblikovanjem etringita in/ali taumazita .



**Slika 48: Biodegradacija: (a)alge na zunanji strani hiše (b)poškodba betona zaradi žveplene kisline v kanalizaciji (c)razpadajoča betonska tla v poplavljeni kleti.**

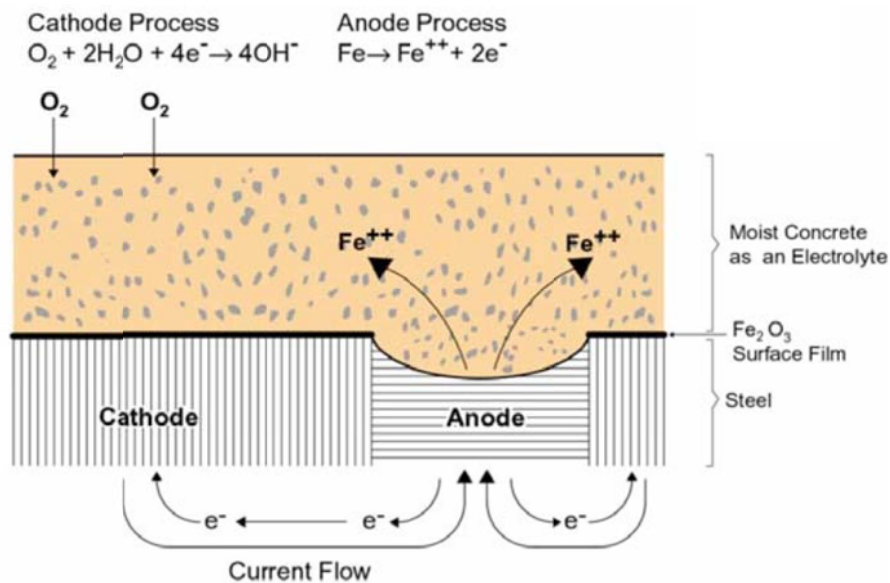
Vir: D.J. Naus, 2007.

## 6.2 Mehanizmi propadanja armaturnega jekla ter jekla za prednapenjanje

### 6.2.1 Korozija jekla

Jekleno armaturo se vgrajuje v beton na mestih, kjer se pričakujejo natezne napetosti. Jeklo in beton se mesebojno dopolnjujeta: jeklo prevzame natezne napetosti in ovira širjenje razpok v betonu, beton pa mu nudi zaščito proti koroziji z visoko alkalnostjo cementa, saj znaša pH porne raztopine na začetku od 12,5 do 13,5 in nikoli ne pade pod 12 če je v matrici cementnega kamna navoljo  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . S pasivacijo jekla se tako ustvari tanka, zelo čvrsta oksidna plast ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), kot prikazuje slika 49.



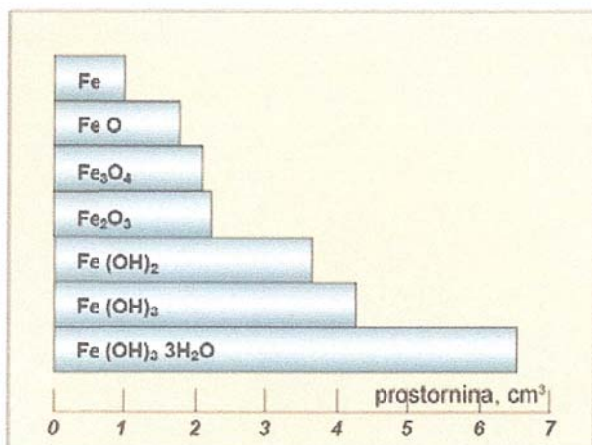


**Slika 49: Shematični prikaz korozije v betonu.**

Vir: D.J. Naus, 2007

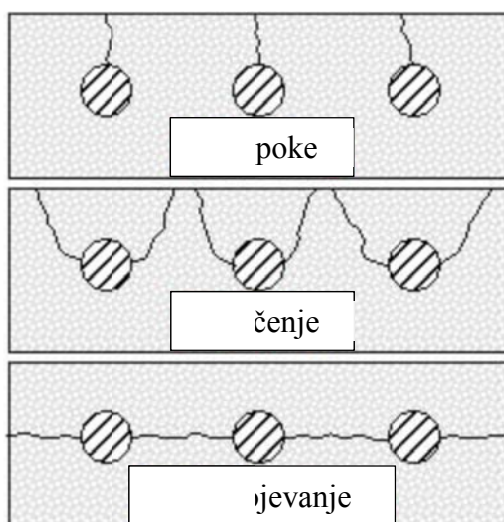
Dokler obstaja pasivna zaščita, jeklo ni izpostavljeno koroziji. Do poškodbe pasivne zaščite in posledično do elektrokemijskega procesa (korozije), pri katerem nastajajo na površini jeklenih palic korozijske celice, kot so katoda in anoda, pride zaradi dveh spodaj navedenih vzrokov.

- Depasivacija zaradi padca pH vrednosti cementne matrice v okolici jekla je povezana z reakcijo karbonatizacije, ki je kot kemični proces v betonu predstavljena v poglavju Reakcije, pri katerih pride do izmenjave kationov. Ker se s pojavom karbonatizacije v okolici jekla močno zmanjša pH, ni več zagotovljene obstojnosti pasivnih filmov, kar privede do pričetka korozije jeklene armature. Tako pričnejo zaradi vlage, O<sub>2</sub> in drugih pospeševalcev korozije nastajati železovi hidroksidi, ki imajo slabo oprijemljivost in nekajkrat večje volumna kot nekorodirano jeklo (slika 50). Zaradi povečanja volumna pride do razpok, razslojevanja in luščenja betona (slika 51).



Slika 50: Prostornina različnih oblik Fe- oksidov in hidroksidov.

Vir: Bokan in žarnić, 2006



Slika 51: Vrste poškodb betona zaradi korozije jekla.

Vir: D.J. Naus, 2007

- Korozija zaradi kloridov se pojavi zaradi depasivacije na posameznih mestih in sicer pri nekem kritičnem deležu kloridov, ki so lahko prisotni že v svežem betonu ali pa vstopajo v strjen beton zaradi delovanja medijev, ki vsebujejo kloridne ione. Korozija je odvisna še od pH vrednosti raztopine v porah betona, saj je pri majhnih vrednostih delovanje kloridov največje. Zaradi enakomerne korozije prihaja do hitrega zmanjševanja nosilnega prereza jeklene armature. Pri višjih vrednostih pH-ja v porah raztopinah pa je površinska zaščita obstojnejša, vendar agresivni kloridi rušijo zaščito na šibkejših mestih. Zato prihaja do jamičaste korozije. Oba načina korozije sta prikazana na sliki 53.



Slika 52: Korozija armiranega betona: (a) objekt v stiku z morskovo vodo, (b) poškodba AB mostu  
Vir: D.J. Naus, 2007



Slika 53: Prikaz enakomerne in jamičaste korozije.  
Vir: D.J. Naus, 2007

Galvanski proces lahko poteka le, če elektroni, ki nastanejo z ionizacijo železa na anodi, tečejo proti katodi in če je na površini armature dovolj vode in kisika, da vežeta elektrone v OH<sup>-</sup> ione. Zato morajo biti za začetek korozijskega procesa izpolnjeni naslednji pogoji:

- med anodo in katodo mora obstajati razlika v električnih potencialih,
- na katodi mora biti na razpolago dovolj kisika, ki s površine betona z difuzijo stalno prodira do površine armature,
- med anodnim in katodnim območjem na površini jekla morata biti omogočena tok elektronov in tok ionov, zato morata biti oba pola med seboj povezana, električno preko armaturne palice in elektrolitsko z vlažnim betonom.

Če le eden od zgornjih pogojev ni izpolnjen, korozija jekla v betonu ne more potekati.

## 6.2.2 Vpliv temperaturne izpostavljenosti

Konstruktivski elementi, ki so izdelani iz armiranega betona imajo zaradi svoje tipične velikosti, visoko toplotno vztrajnost, ki povzroča sorazmerno počasne rasti temperature skozi prerez. Kot rezultat tega se ohranijo dovolj nizke temperature armature, da se izognemo

močnemu mehčanju jekla. Poleg tega so armiranobetonske konstrukcije monolitne narave in tako obstaja alternativna pot obremenitve in izolacije požara. Armiranobetonske konstrukcije prenašajo obtežbo tudi v povišanih temperaturnih pogojih, ki bi nastali zaradi požara, vendar pod določenimi pogoji (npr. hiter dvig temperature). Pri poškodovanem (razpokanem) betonu se lahko pojavi izpostavljenost jeklene armature vplivu povišane temperature.

### **6.2.3 Napetostna korozija in vodikova krhkost zelo trdne armature v prednapetih konstrukcijah**

Nastanek napetostne korozije, vodikove krhkosti ali kombinacije obeh je posledica atmosferskih vplivov, zmrzali, obrabe, itd. Ti povzročajo vdor korodirnega medija do posameznih žic ali kablov v prednapetih konstrukcijah. V konstrukcijah z dinamično obremenitvijo je možno tudi nastajanje korozijske utrujenosti, katere napredovanje je lahko ob prisotnosti napetostne korozije in vodikove krhkosti zelo hitro.

Pojav je zapleten zaradi vzajemnega delovanja krhkosti kovin zaradi napetostne korozije in delovanja vodika, ki povzroča vodikovo krhkost. Obstajajo teorije, ki vsaka po svoje z različnih stališč obravnavajo mehanizme, ki so tesno povezani z mikrostrukturo kovine, njeno kristalno zgradbo, napakami v kristalni mreži in energijskimi stanji, kemično sestavo, zasedenostjo elektronskih obel, vrsto korodirnega medija, njegove stopnje disociacije, ionsko sestavo, pH vrednostjo, absorpcijsko sposobnostjo specifičnih ionov na površino kovine v razpoki, temperaturo, pri kateri se odvijajo korozijski procesi in od velikosti napetosti v materialu. Za nastanek napetostno-korozijskega pokanja so potrebni ustrezni korodirni mediji, napetosti in za te procese občutljiv material (visokotrdno jeklo za prednapenjanje). Dejavniki za pospeševanje vodikove krhkosti pa so skoraj natanko isti, kot dejavniki za nastanek napetostne korozije. Za nastanek vodikove krhkosti, napetosti v materialu niso potrebne, jo pa, če so prisotne, močno pospešijo.

Napetostna korozija in vodikova krhkost se pojavljata brez vidnejših zunanjih sledov, saj je širjenje obeh interkristalno ali transkristalno. Nevarnost preži ravno v tem, ker je zaznavanje poškodb, ki povzročajo nenadne krhke zlome zelo težavno.

### **6.2.4 Blodeči istosmerni tokovi**

Armiranobetonske in prednapete konstrukcije, ki so v zemlji, so lahko izpostavljene blodečim istosmernim tokovom, ki povzročajo močne elektrokemične korozijske poškodbe. Ti tokovi

se širijo npr. iz tirnic elektrificiranih prog ali naprav (galvanske kadi, postaje katodne zaščite, itd. ), če so povezane z izvori istosmernega toka. Tokovi na svoji poti naletijo na razne kovinske dele, v katere tudi vstopajo. Izstopijo na ugodnih mestih in se vračajo k izvoru (npr. k tirnici železniške proge ). Na mestu, kjer istosmerni tok izstopa, predstavlja anodo, ki zaradi močne zunanje polarizacije z istosmernim tokom intenzivno korodira. Mesto, kjer tok vstopa in preostale površine, pa so katodne narave in korozija ne nastaja.

## 7 SKLEP

V okviru diplomske naloge je bila pregledana dosegljiva literatura s področja propadanja betonskih zgradb v jedrskih objektih, pri čemer se je pokazalo, da so procesi propadanja betonov v teh objektih precej podobni, kot pri ostalih betonskih konstrukcijah, ki so izpostavljene enakim okoljskim vplivom. Razlikujejo se predpisi, ki so v tem primeru veliko strožji.

Ustrezno visoko odpornost betona dosežemo s pravilno izbiro osnovnih materialov (cement, agregat, voda ter kemijski in mineralni dodatki za izboljšanje lastnosti betona), z ustreznim vgrajevanjem in nego, da ne pride do oblikovanja površinskih razpok, saj prav te olajšajo vdor škodljivih snovi v notranjost prereza.

Odpornost armiranobetonskih elementov dosežemo s pravilno izbiro armature, porazdelitvijo armaturnih palic in ustrezno debelino in kvaliteto zaščitnega sloja betona, s pravilno izvedbo detajlov ter konstrukcijskih in ostalih stikov.

Jasno je tudi, da skoraj nikoli ne pride do enega samega procesa, zaradi katerega se prične propadanje betona, ampak vedno obstaja več istočasnih procesov in različnih interakcij med njimi, ki omogočajo ali celo pospešujejo druge procese in tako tudi hitrejšo propadanje.

Razpoke, ki se pojavijo zaradi mehanskih obremenitev je skoraj nemogoče popolnoma preprečiti, zato so konstrukcije, ki so neposredno izpostavljene zunanjim okoljskim vplivom, prevlečene z zaščitnimi premazi, ki preprečujejo vdor škodljivih snovi v beton in izpiranje produktov hidratacije z mehкими vodami (dežjem).

Če so upoštevane vse smernice za zagotovitev odpornosti betona, se pri normalni uporabi in rednemu vzdrževanju doseže projektirano življensko dobo objekta brez večjih poškodb.



## **VIRI**

Alkalno agregatne reakcije. 2011.

[www.cement.org/tech/cct\\_dur\\_AAR.asp](http://www.cement.org/tech/cct_dur_AAR.asp) (Pridobljeno 6. 9. 2011.)

Bokan, Bosiljkov, V., Žarnić, R. 2006. Izdelava metodologije za presojo varnosti inženirskih pregrad odlagališča nizko in srednje radioaktivnih odpadkov, Končno poročilo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preizkušanje materialov in konstrukcij: str. 1-82.

Čebular, U., Grum, B. 2004. Sanacije betonskih objektov v različnih okoljih. V: Grum B. (ur.) Sanacije betonskih objektov. Ljubljana, I2 družba za založništvo, izobraževanje in raziskovanje: str. 11-103.

Delovanje reaktorjev. 2011.

<http://www.en.wikipedia.org> (Pridobljeno 16. 7. 2011.)

Delovanje zapoznelega etringita. 2004.

[www.fhwa.dot.gov/publications/transporter/04jul/index.cfm#adv](http://www.fhwa.dot.gov/publications/transporter/04jul/index.cfm#adv) (Pridobljeno 6. 9. 2011.)

Deltec, Nelson čepi. 2011.

[www.deltec.fr](http://www.deltec.fr) (Pridobljeno 15. 8. 2011.)

Gerbec, B. 2004. Preučevanje korozijske odpornosti betonov.

[http://www.gi-zrmk.si/images/TC/4\\_članek.pdf](http://www.gi-zrmk.si/images/TC/4_članek.pdf) (Pridobljeno 18. 7. 2011.)

Gerbec, B., Pelan, M. 2006. Obnavljanje betonskih in zidanih gradbenih elementov.

[http://www.gi-zrmk.si/images/TC/5\\_članek.pdf](http://www.gi-zrmk.si/images/TC/5_članek.pdf) (Pridobljeno 30. 7. 2011.)

Izobraževalni center za jedrsko tehnologijo, Uporaba jedrske energije. 2011.

<http://www.icjt.org> (Pridobljeno 16. 7. 2011.)

Oblike izpostavljenosti betona okolju. 2011. JADRANKA d.o.o. Koper.

[www.jadranka.si](http://www.jadranka.si) (Pridobljeno 25. 8. 2011.)

Kavčič, F. 2011. Betonske konstrukcije v okolju s kemično agresijo.

<http://www.salonit.si/uploads/files/Predavanje3.pdf> (Pridobljeno 18. 7. 2011.)



Naus, D.J. 2007. Primer on durability of nuclear power plant reinforced concrete structures - a review of pertinent factors.

<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr6927/cr-6927.pdf>

(Pridobljeno 24. 8. 2011.)

Nuklearna elektrarna Krško, Vrste jedrskih reaktorjev. 2011.

[http://www.nek.si/sl/o\\_jedrski\\_tehnologiji/jedrski\\_reaktor/tipi\\_reaktorjev](http://www.nek.si/sl/o_jedrski_tehnologiji/jedrski_reaktor/tipi_reaktorjev) (Pridobljeno 15. 7. 2011.)

Shah, V. N., Hookham, C. J. 1998. Long-term aging of light water reactor concrete containments. Nuclear engineering and design 185, 1: 51-81.

Silvery dragon PC products group company, Žice za prednapenjanje. 2011.

[www.pcsteelwire.com](http://www.pcsteelwire.com) (Pridobljeno 15.08.2011.)

SIST 1026:2008 - Beton-1.del: Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost – Pravila za uporabo SIST EN 206-1.

SIST EN 206-1: 2003/A2: 2005, - Beton-1.del - Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost.

Sulfatni napadi v betonu. 2011.

[www.understanding-cement.com/sulfate.html](http://www.understanding-cement.com/sulfate.html) (Pridobljeno 04. 9. 2011.)

Wittmann, F. 1977. Grundlagen eines modells zur beschreibung charakteristischer betoneigenschaften, DafS, zvezek 232.

Žarnič, R. 2005. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preizkušanje materialov in konstrukcij: str 54-119.