

Prof. dr. sc. Marko Pršić, dipl. ing. građ.

PLOVNI PUTEVI I LUKE

Poglavlje: 2 Građenje u moru

22.04.2009.

Predmet: PLOVNI PUTEVI I LUKE

Poglavlje: Građenje u moru

Napisali: prof. Marko Pršić, prof. Dubravka Bjegović, asist. Marijana Serdar

Sadržaj:

2	GRAĐENJE U MORU	3
2.1	GRADIVA POMORSKIH GRADNJI	3
2.2	DJELOVANJE MORA NA GRADIVA	3
2.3	BETON I ARMIRANI BETON U MORU	4
2.3.1	KOROZIJA BETONA I ARMIRANOG BETONA U MORU	4
2.3.1.1	KOROZIJA BETONA	5
2.3.1.2	KOROZIJA ARMATURE U ARMIRANOM BETONU	5
2.3.1.2.1	Korozija armaturnog čelika uslijed karbonatizacije	7
2.3.1.2.2	Korozija armaturnog čelika uslijed djelovanja klorida	8
2.3.1.2.3	Posljedice korozije armaturnog čelika na armiranobetonsku konstrukciju	10
2.3.2	UKLJUČIVANJE TRAJNOSNIH ELEMENATA U PROJEKTIRANJE BETONSKIH KONSTRUKCIJA	10
2.3.2.1	PRISTUP PROJEKTIRANJU NOVIH BETONSKIH KONSTRUKCIJA SA STAJALIŠTA TRAJNOSTI	10
2.3.2.2	ODREDNICE O TRAJNOSTI U TEHNIČKOM PROPISU ZA BETONSKE KONSTRUKCIJE (TPBK)	11
2.3.2.2.1	Razredi izloženosti	12
2.3.2.2.2	Tehnička svojstva i zahtjevi za beton u morskom okolišu	13
2.3.2.2.3	Određivanje trajnosnih svojstava betona	18
2.3.3	Ugradba betona pod vodom	19
2.4	Pomorski radovi	24
2.4.1	Podmorski iskopi	25
2.4.1-1	Podmorski iakop razravnog tla	25
2.4.2	Nasipi u moru	26
2.4.2-1	Kameni materijal	26
2.4.2-2	Betonski materijal za nasipne radove	29
2.4.2-3	Transport materijala za nasipne radove	29
2.4.2-4	Ugradba materijala za nasipne radove	29
2.4.2-5	Planiranje pod morem	29
2.4.3	Betonske podmorske konstrukcije	31
2.4.3-1	Podmorski kalupni beton	31
2.4.3-2	Betonski elementi	31
2.4.4	Metalne konstrukcije	33
2.4.5	Ostale konstrukcije	33
2.4.5-1	Bitumenske konstrukcije	33
2.4.5-2	Plastični materijali	33
2.4.5-3	Gabioni	33
2.5	Tehnologija gradnje nasipnog lukobrana	34
2.6	Tehnologija gradnje vertikalnog lukobrana	38

2 GRAĐENJE U MORU

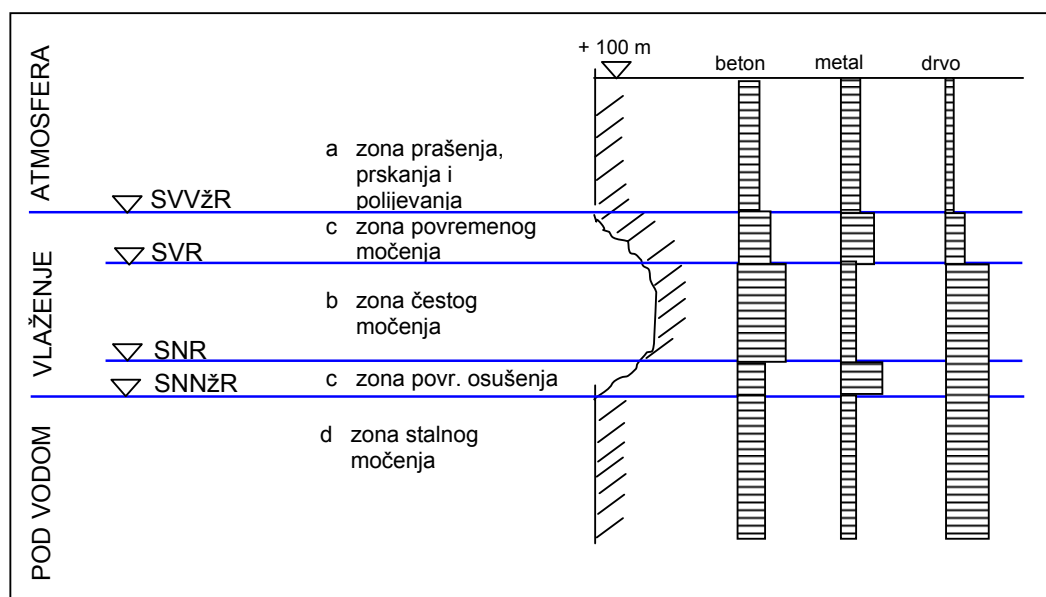
2.1 GRADIVA POMORSKIH GRADNJI

Gradiva koja se upotrebljavaju za građenje u moru:

- kamen
- beton
- armirani beton
- čelik
- prokrom čelik (inox)
- lijevano željezo
- bronca
- drvo
- bitumen
- geotekstil
- sintetika
- gabionske mreže.

2.2 DJELOVANJE MORA NA GRADIVA

Morska sredina stalno izaziva kemijska i mehanička oštećenja gradiva i konstrukcije.



Sl. 2.1.1::1 Visinske zone utjecaja mora na gradiva

Stoga je pitanje trajnosti od velike važnosti. U pogledu jačine oštećenja po visini razlikuju se sljedeće četiri zone napada: a, b, c i d (Sl. 2.1.1::1).

2.3 BETON I ARMIRANI BETON U MORU

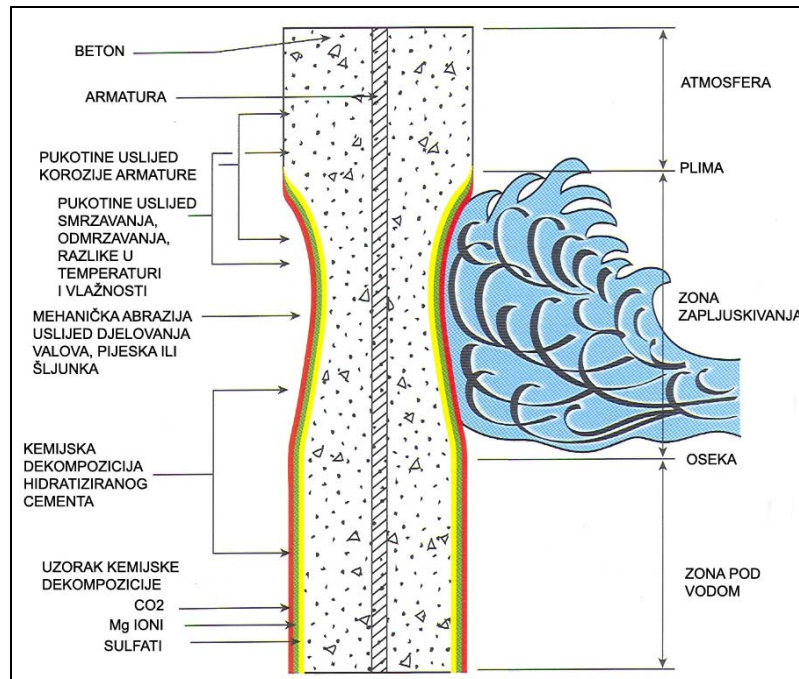
Pomorski betoni u pomorskom graditeljstvu mogu biti predgotovljeni (montažni) ili monolitni (ugrađeni na licu mjesta). **Predgotovljeni** betoni omogućavaju uvijek kvalitetnije konstrukcije, jer se zahtjevi na pomorski beton mogu potpuno ispuniti.

Druga je stvar s monolitnim betonima; t.j. betonima ugrađenim u konstrukciju na gradilištu. Tu razlikujemo tehnološki dvije vrste betona:

- *nadmorski* betoni, iznad vode (ugrađeni u suhom), koji su doduše pod utjecajem mora, ali koji dosta dobro omogućavaju ispunjenje zahtjeva za kvalitetne pomorske betone;
- *podmorski* betoni betonirani pod morem. Betoniranje pod vodom je teška tehnička zadaća koja pretpostavlja dosta iskustva. Zato se taj način gradnje – kad god je to moguće – zamjenjuje predgotovljenim betonima izrađenim u pogonu, ili na suhom na gradilištu.

2.3.1 KOROZIJA BETONA I ARMIRANOG BETONA U MORU

Između svih različitih opterećenja iz okoliša kojima armiranobetonska konstrukcija može biti izložena tijekom njenog uporabnog vijeka, maritimni okoliš predstavlja jedan od najsloženijih i najagresivnijih utjecaja na konstrukciju. Upravo su u takvom agresivnom maritimnom okolišu Jadrana neke od najvećih armiranobetonskih konstrukcija u Hrvatskoj. Osnovni kemijski i mehanički procesi degradacije koji nastupaju prilikom dužeg izlaganja armiranobetonske konstrukcije morskoj vodi prikazani su na slici 2.3.1::1.

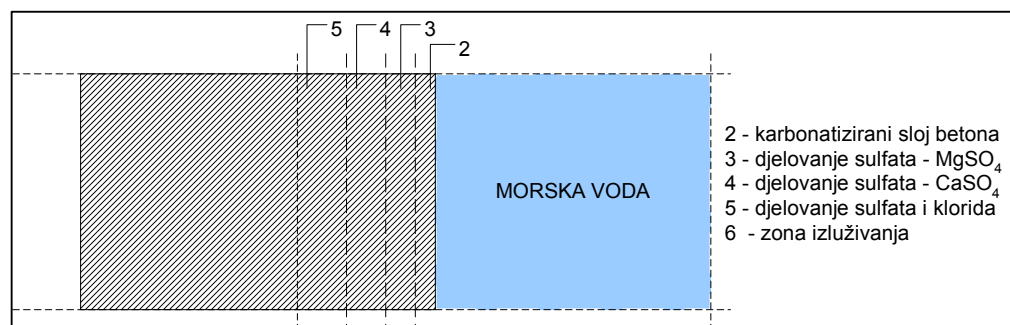


Sl. 2.3.1::1 Utjecaj morske vode na armiranobetonsku konstrukciju

Degradacija armiranobetonskih konstrukcija u morskoj vodi rezultat je više kemijskih reakcija koje se odvijaju istovremeno, a prvenstveno su uzrokovane djelovanjem klorida i sulfata. Utjecaj klorida na svojstva konstrukcije je višestruk, no svakako je najvažnije da izazivaju koroziju armature i degradaciju betona.

2.3.1.1 KOROZIJA BETONA

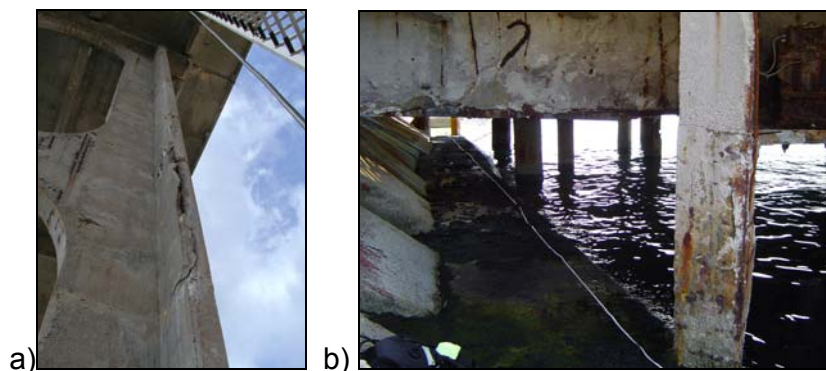
Degradacija betona uslijed djelovanja morske vode nastaje zbog kemijske razgradnje i luženja sastojaka hidratiziranog cementa, ekspanzije i pojave pukotina, te ljuštenja i pucanja betona. Na slici 2.3.1.1::1 prikazana je shema procesa degradacije betona u morskoj vodi. Karbonatizacija je kemijski proces pri kojem ugljični-dioksid CO_2 iz zraka reagira s kalcij hidroksidom $\text{Ca}(\text{OH})_2$ iz površinskog sloja betona, pri čemu nastaju slabo topljivi kalcij karbonat. Proces karbonatizacije na beton djeluje pozitivno, produkti karbonatizacije zapunjavaju strukturu betona i povećavaju nepropusnost, ali djeluje negativno na armaturu u armiranom betonu, jer se uslijed karbonatizacije snižuje pH vrijednost porne vode u betonu čime se povećava rizik od korozije (detaljnije objašnjeno u poglavlju 2.3.1.2). Reakcijom magnezij sulfata iz mora i kalcij hidroksida iz betona nastaje sekundarni gips i slabo topivi magnezij hidroksid (mineral brucit), koji također zapunjavaju strukturu betona. Djelovanjem sekundarnog gipsa u dubljem sloju betona dolazi do formiranja etringita koji buja i razara strukturu betona.



Sl. 2.3.1.1::1 Degradacija betona uslijed djelovanja morske vode

Ovaj proces bit će jači i brži ako beton uslijed premašenja naprežavanja (čega kod dobro dimenzionirane konstrukcije ne smije biti) dobije pukotine koje otvaraju put koroziji dublje u beton.

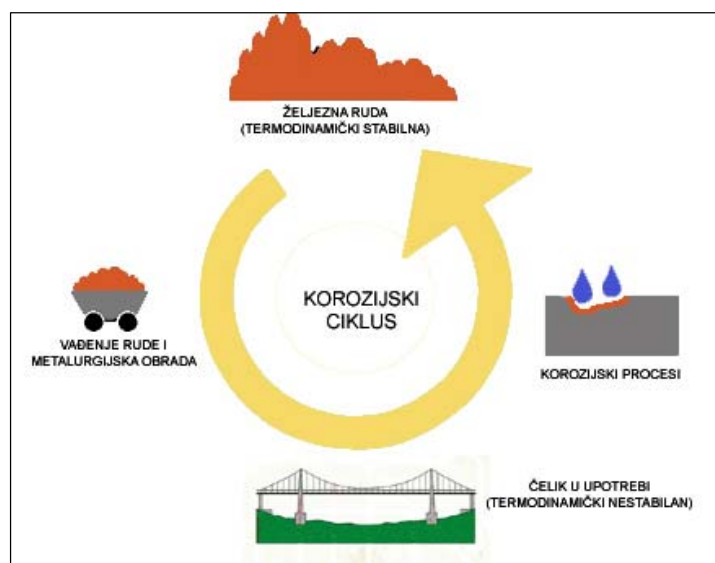
2.3.1.2 KOROZIJA ARMATURE U ARMIRANOM BETONU



Sl. 2.3.1.2::1 Oštećenja uzrokovano korozijom a) Krčki most, b) Torpedo, Rijeka

Korozija armature u armiranom betonu je uzročnik brojnih otkazivanja nosivih armiranobetonskih konstrukcija (Slika 2.3.1.2::1), te stoga predstavlja jedan od značajnijih čimbenika pri proračunu novih i održavanju postojećih građevina.

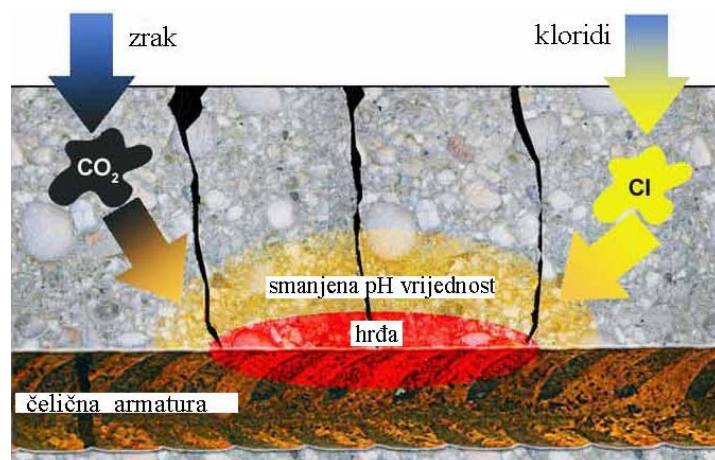
Gotovo svi metali i njihove legure su u nestabilnom termodinamičkom stanju i u osnovi teže vraćanju u stabilnije stanje procesom korozije. Korozijski ciklus se može objasniti i kao elektrokemijski proces kojim se metal koji je u visoko energetske stanju (dobiven iz rude uz upotrebu energije) vraća u niže energetske stanje (stabilnije) reagirajući s okolinom i oslobađajući energiju, pri čemu nastaje korozijski produkt (hrđa na čeliku) koji je sličan početnoj rudi iz koje je dobiven (slika 2.3.1.2::2).



Slika 2.3.1.2::2 Korozijski ciklus

U armiranobetonskog konstrukciji koja je izložena utjecajima iz morskog okoliša dva su osnovna razloga korozije armature u betonu:

- 1 smanjivanja pH razine betona zbog reakcije hidroksida iz cementa s atmosferskim CO_2 ; t.j.karbonatizacija koja razara "kemijsku" i "fizičku" zaštitne barijere betona oko armaturnog čelika
- 2 penetracije klorida u pore oko armature (kod dovoljno visoke koncentracije iona klora mogu destabilizirati pasivizirajući film iako pH vrijednost porne vode ostaje nepromijenjena).



Slika 2.3.1.2::3 Uzroci korozije armature u betonu

Oba su procesa potpomognuta pukotinama od naprezanja konstrukcije ako ih je bilo.

2.3.1.2.1 Korozija armaturnog čelika uslijed karbonatizacije

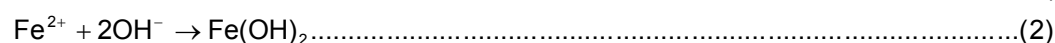
U uvjetima neagresivne okoline kvalitetan beton pruža dobru antikorozivnu zaštitu armaturnom čeliku. Neposredno nakon procesa hidratacije na čeliku se stvara tzv. zaštitni pasivni sloj oksida željeza, koji je nepropustan i stabilan sve dok je pH vrijednost porne vode u betonu dovoljno visoka ($\text{pH} \geq 12$). Čelik na taj način nije izložen koroziji sve dok se ne uništi spomenuti zaštitni pasivni sloj.

Formiranje i stabilnost pasivnog sloja na površini čelika ovisi o pH vrijednosti porne vode koja okružuje armaturu. Ako nema klorida ili drugih iona pasivni film se stvara i održava neograničeno i učinkovito sprječava nastanak korozije sve dok je pH razina porne vode dovoljno visoka ($\text{pH} \geq 12$).

Dakle rizik korozije armature je minimalan u dobro projektiranoj konstrukciji s dovoljnom debljinom kvalitetno izvedenog zaštitnog sloja koji pruža kemijsku i fizičku barijeru koroziji.

U određenim uvjetima, a to je npr. ako se pH betona (ustvari porne vode u betonu) uslijed karbonatizacije ili djelovanja kiselih otopina smanji, te beton postane približno neutralan ($\text{pH} < 9$ do 10), ili ako je količina klorida veća od tzv. kritične vrijednosti, te ako ima dovoljno vlage i kisika, može započeti proces korozije.

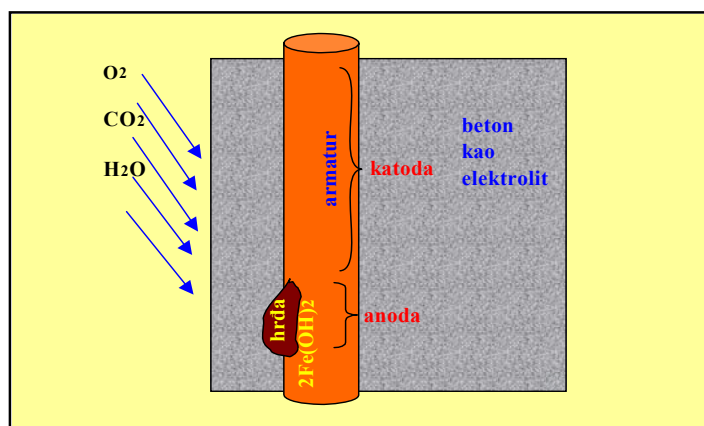
“Kemijska barijera” je visoko lužnata (alkalna) porna voda ($\text{pH} > 12$). Ona omogućuje formiranje i održavanje filma od zaštitnog pasivnog sloja na površini čelika. Formiranje filma može se prikazati sljedećim jednažbama (Bertolini et al., 2004):



Pasivizirajući film može biti od željezo(II)oksida ili željezo(III)oksida. Oba su kemijski stabilni u betonu ukoliko nema procesa karbonatizacije i/ili prisutnosti klorida. Željezo(III)oksid je puno stabilniji, osobito u prisutnosti klorida, dok oba gube svojstva ukoliko razina pH padne ispod 12.

“Fizička barijera” je nepropusnost zaštitnog sloja betona, koji ograničava prodiranje kisika do armature sprječavajući time korozijsku reakciju, čak i uz oštećen pasivizirajući film na površini armature.

Korozija armature započne kada se smanji djelovanje kemijske barijere i kad pasivizirajući film postane nestabilan; t.j. kad započne t.z.v. depasivizacija. Daljnje napredovanje korozije armature ide s razaranjem “fizičke barijere”; t.j. s pukotinama i poroznošću betona. Lokalna depasivizacija se događa na površini armature u blizini pukotina koje mogu nastati uslijed korozije betona ili uslijed premašenja naprežanja u betonu. Korozija je u ovom slučaju lokalna, gdje se depasivizirana zona ponaša kao anoda. Masovna depasivizacija se može pojaviti i na velikoj površini armature kada je beton porozan (ima slabu “fizičku barijeru”), jer dolazi do penetracije ugljičnog dioksida (CO_2) do površine armature. U ovom slučaju dolazi do opće korozije na mnogo mjesta na površini armature, koja se ponašaju kao anode (Sl. 2.3.1.2.1.:1).



Slika 2.3.1.2.1.:1 Galvanski članak u betonu

Kada korozijski proces započne njegova brzina ovisi o nekoliko uvjeta; dva najvažnija su: dostupnost kisika na katodnim područjima i prisutnost vodene otopine u porama betona u blizini armature, slika 2.3.1.2::3. Ti uvjeti su neophodni, jer mora postojati medij kroz koji će teći struja iona od katode prema anodi.

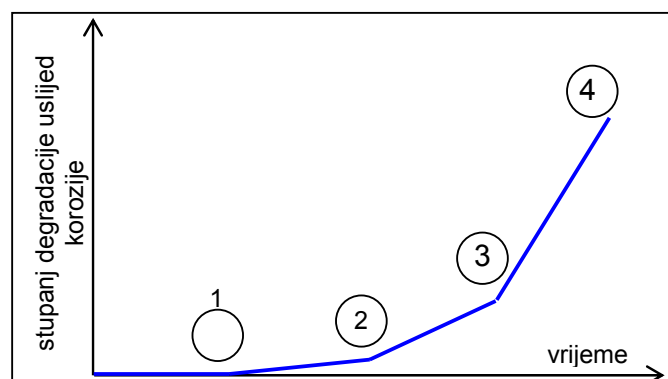
Formiranje i stabilnost pasivnog sloja na površini čelika ovisi o pH vrijednosti porne vode koja okružuje armaturu. Ako nema klorida ili drugih iona pasivni film se stvara i održava neograničeno i učinkovito sprječava nastanak korozije sve dok je pH razina porne vode dovoljno visoka ($\text{pH} \geq 12$).

2.3.1.2.2 Korozija armaturnog čelika uslijed djelovanja klorida

Glavni uzročnik korozije armature su ioni klora iz porne vode u betonu i iz okoline (koji pak mogu mijenjati koncentraciju klora u pornoj vodi). Koroziji uzrokovanoj kloridima najviše su izložene armiranobetonske konstrukcije u maritimnom okolišu kao i armiranobetonske konstrukcije prometnica, koje se zimi nekontrolirano posipaju solju za odmrzavanje.

Ukupna količina klorida u betonu sastoji se od vezanih i slobodnih iona klora u pornoj vodi i betonu, čiji zbroj čini ukupan sadržaj klorida, a može se izraziti na masu cementa u betonu ili na ukupnu masu betona. U procesu korozije sudjeluju samo slobodni ioni klora otopljeni u pornoj vodi. Korozija uzrokovana ionima klorida može se podijeliti u četiri osnovna stupnja, kao što je prikazano na slici 2.3.1.2.2::1 na kraju kojih su četiri karakteristične posljedice korozije:

1. razaranje pasivnog sloja armature uz koroziju čelika i smanjenje površine presjeka armaturnih šipki,
2. raspucavanje betona uz otvaranje puta jačem procesu korozije,
3. ljuštenje betona uz otvaranje puta masovnom procesu korozije i
4. slom konstrukcije.



Slika 2.3.1.2.2::1 Stupnjevi degradacije armiranobetonske konstrukcije uslijed korozije (Rostam, 1999)

Karakteristične pojave na površini armiranobetonske konstrukcije po kojima se može odrediti stupanj degradacije uslijed korozije prikazane su na slikama 2.3.1.2.2::2, 2.3.1.2.2::3, 2.3.1.2.2::4 i 2.3.1.2.2::5.

Utjecaj iona klora Cl^- na depasivaciju čelika, i pri visokim razinama pH porne vode, može se objasniti kao “natjecanje” dva procesa: stvaranje i obnavljanje pasivizirajućeg filma od strane hidroksilnih iona OH^- i razaranje filma djelovanjem iona klorida Cl^- . Kad kloridni ion jednom razori zaštitni pasivni sloj oko armature omogućen je pristup iona klora na armaturni čelik. Uslijed toga dolazi do formiranja željeznog klorida koji se u reakciji s vodom i kisikom rastvara na željezni hidroksid, slobodni vodik i kloridni ion, što dovodi do daljnjeg razaranja pasivnog filma i formiranja toka struje između anodnih i katodnih područja armature.



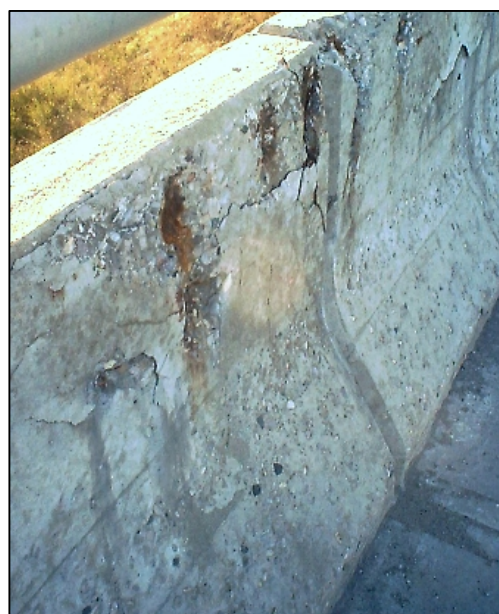
Slika 2.3.1.2.2::2 Pojava mikropukotina



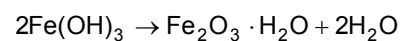
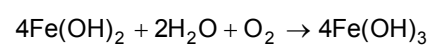
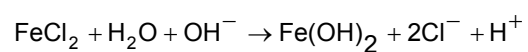
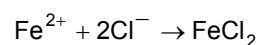
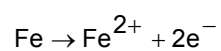
Slika 2.3.1.2.2::3 Pojava smeđih mrlja na betonu



Slika 2.3.1.2.2::4 Ljuštenje zaštitnog sloja



Slika 2.3.1.2.2::5 Otpadanje većih komada

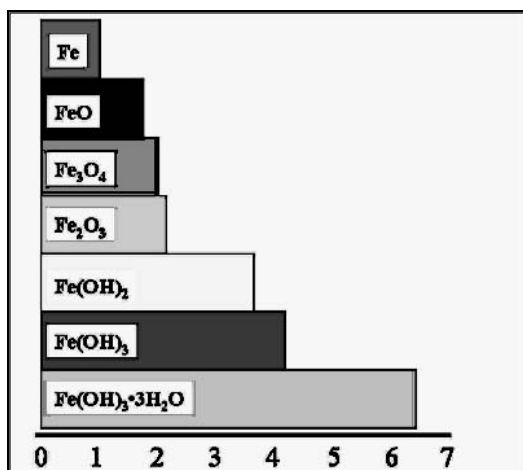


Vidljivo je da se ioni klora Cl^{-} regeneriraju jer nastali produkt korozije, hrđa, ne sadrži ione klora, iako se željezni klorid stvara u najranijoj fazi. Time se omogućuje trajno djelovanje klorida i daljnji proces korozije.

Depasivizacija površine čelika se događa onda kada je na razini armature dosegnuta vrijednost koncentracije klorida koju nazivamo *kritična koncentracija klorida*. Iz laboratorijskih eksperimenata na čeliku uronjenom u otopinu poznate pH vrijednosti dobiveno je da je prekid pasivnog sloja kontroliran koncentracijom slobodnih kloridnih iona u odnosu na koncentraciju hidroksilnih iona i ustanovljena je vrijednost praga $Cl/OH^- = 0,6$. U praksi se kritična koncentracija klorida C_{cr} određuje u odnosu na masu cementa ili na masu betona, a uglavnom su prihvaćene vrijednosti: $C_{cr} = 0,4 \%$ na masu cementa, odnosno $C_{cr} = 0,05 \%$ na masu betona. Kritična koncentracija klorida je važan parametar za procjenu vijeka armiranobetonskih konstrukcija osjetljivih na kloride kao i za popravak konstrukcija gdje su kloridi prodri u betonski zaštitni sloj, ali gdje još nije počela korozija armature.

2.3.1.2.3 Posljedice korozije armaturnog čelika na armiranobetonsku konstrukciju

- *Prva posljedica* procesa korozije armature kod armiranobetonskih konstrukcija je da se smanjuje poprečni presjek armature, a time i njezina nosivost.
- *Druga posljedica* je da produkti korozije zauzimaju veći volumen nego čelik (čak i do šest puta veći), što uzrokuje vlačna naprezanja u betonu. Ako su vlačna naprezanja u betonu veća od njegove vlačne čvrstoće, rezultat je pucanje betona i ljuštenje zaštitnog sloja (Sl. 2.3.1.2.3::1) što otvara put još jačem procesu korozije.

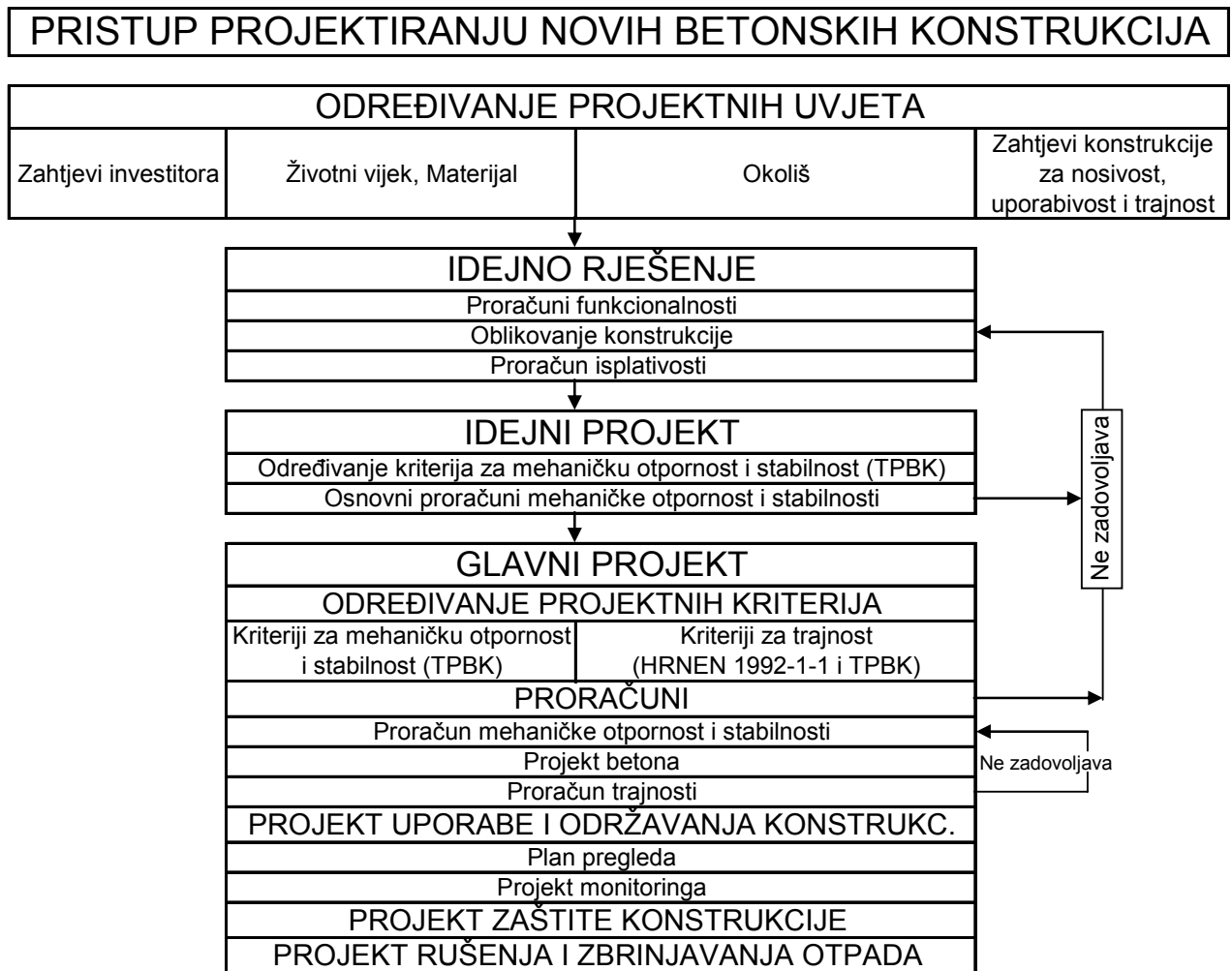


Slika 2.3.1.2.3::1 Povećanje volumena prilikom korozije čelika u armiranom betonu

2.3.2 UKLJUČIVANJE TRAJNOSNIH ELEMENATA U PROJEKTIRANJE BETONSKIH KONSTRUKCIJA

2.3.2.1 PRISTUP PROJEKTIRANJU NOVIH BETONSKIH KONSTRUKCIJA SA STAJALIŠTA TRAJNOSTI

Na slici 2.3.2.1::1 dana je shema projektiranja novih armiranobetonskih konstrukcija izloženih djelovanju maritimnim uvjetima.



Slika 2.3.2.1.:1 Shema projektiranja armiranobetonskih konstrukcija s naglaskom na trajnost

2.3.2.2 ODREDNICE O TRAJNOSTI U TEHNIČKOM PROPISU ZA BETONSKE KONSTRUKCIJE (TPBK)

Postupci proračuna stabilnosti, nosivosti i deformacija konstrukcija dobro su definirani i matematički precizirani na principima tehničke mehanike u propisima, normama i raznim preporukama za projektiranje armiranobetonskih i prednapetih konstrukcija. Trajnost konstrukcija se još uvijek propisuje iskustvenim pravilima za materijale i tehnologiju, što uključuje propisani vodocementni omjer, marka betona, minimalna količina cementa, aeriranje i vrijeme njegovanja betona. No samo time se ne osigurava zahtijevani životni vijek armiranobetonske konstrukcije što dokazuju brojni primjeri starijih armiranobetonskih konstrukcija oštećenih korozijom. U nekim slučajevima oštećenja uslijed opterećenja iz okoline su uzrokovala kolaps konstrukcije. Takvi slučajevi su potaknuli nova istraživanja različitih mehanizama degradacije materijala koja još nisu ušla u propise.

U novom Tehničkom propisu za betonske konstrukcije (TPBK, 2006), koji je stupio na snagu u srpnju 2006., a oslanja se na europske norme, zahtjevi za beton u pogledu trajnosti su postali bitno stroži. Iako je zadržan konvencionalni pristup (pristup - pretpostavlja se da zadovoljava), proširen je s novim klasama izloženosti, uz posebne zahtjeve na trajnost za specijalne uvjete izloženosti. Nadalje zahtjevi s obzirom na debljinu zaštitnog sloja betona i vodocementni omjer su postali stroži.

2.3.2.2.1 Razredi izloženosti

Tehnički propis za betonske konstrukcije (TPBK) se, glede trajnosti, oslanja na normu *HRN EN 206-1:2006 Beton -- 1. dio: Specifikacije, svojstva, proizvodnja i sukladnost*, prema kojoj se djelovanje okoliša na betonske konstrukcije određuje "**razredima izloženosti**" (Tab. 2.3.2.2.1::I). U vezi razreda izloženosti dani su minimalni tehnološki zahtjevi (Tab. 2.3.2.2.1::II) prema kojima treba projektirati odgovarajuće sastave betona kao i kriteriji za sastav i svojstva betona (tlačna čvrstoća, minimalni zaštitni sloj, maksimalni vodocementni omjer, minimalni sadržaj pora).

Razred	Opis okoliša	Primjeri moguće pojave razreda izloženosti
1 Nema rizika od oštećenja		
X 0	Vrlo suho	Elementi bez armature u neagresivnom okolišu
2 Korozija armature uzrokovana karbonatizacijom ^{a)}		
XC 1	Suho ili trajno vlažno	Elementi u prostorijama obične vlažnosti zraka; elementi stalno uronjeni u vodu
XC 2	Vlažno, rijetko suho	Dijelovi spremnika za vodu; dijelovi temelja
XC 3	Umjerena vlažnost	Dijelovi do kojih vanjski zrak ima stalni ili povremeni pristup; prostorije s atmosferom visoke vlažnosti
XC 4	Cikličko vlažno i suho	Vanjski betonski elementi izravno izloženi kiši; elementi u području kvašenja vodom (slatkovodna jezera i/ili rijeke)
3 Korozija armature uzrokovana kloridima koji nisu iz mora		
XD 1	Umjerena vlažnost	Područja prskanja vode s prometnih površina; privatne garaže
XD 2	Vlažno, rijetko suho	Bazeni za plivanje i kupališta sa slanom vodom; elementi izloženi industrijskim vodama koje sadrže kloride
XD 3	Cikličko vlažno i suho	Elementi izloženi prskanju vode s prometnih površina na koja se nanose sredstva za odleđivanje; parkirališne ploče
4 Korozija armature, uzrokovana kloridima iz mora		
XS 1	Izloženo soli iz zraka, ali ne u izravnom dodiru s morskom vodom	Vanjski elementi u blizini obale
XS 2	Uronjeno	Stalno uronjeni elementi u lukama
XS 3	U zonama plime i prskanja vode	Zidovi lukobrana i molova
5 Djelovanje smrzavanja i odmrzavanja, sa ili bez sredstava za odleđivanje		
XF 1	Umjereno zasićenje vodom, bez sredstva za odleđivanje	Vanjski elementi
XF 2	Umjereno zasićenje vodom, sa sredstvom za odleđivanje ili morska voda	Područja prskanja vode s prometnih površina, sa sredstvom za odleđivanje; područje prskanja morskom vodom
XF 3	Jako zasićenje vodom, bez sredstva za odleđivanje	Otvoreni spremnici za vodu; elementi u području kvašenja vodom (slatkovodna jezera i/ili rijeke)
XF 4	Jako zasićenje vodom, sa sredstvom za odleđivanje ili morskom vodom	Prometne površine tretirane sredstvima za odleđivanje; pretežno vodoravni elementi izloženi prskanju vode s prometnih površina na koja se nanose sredstva za odleđivanje; parkirališne ploče bez zaštitnog sloja; elementi u području morske plime; mjesta na kojima može doći do struganja u postrojenjima za tretiranje voda iz kanalizacije
6 Beton izložen kemijskom djelovanju		
XA 1	Slabo kemijski agresivni okoliš	Spremnici u postrojenjima za tretiranje voda iz kanalizacije, spremnici tekućih umjetnih gnojiva
XA 2	Umjereno kemijski agresivni okoliš, konstrukcije u marinama	Betonski elementi u dodiru s morskom vodom; elementi u agresivnom tlu
XA 3	Jako kemijski agresivni okoliš	Kemijski agresivne vode u postrojenjima za tretiranje otpadnih voda; spremnici za silažu i korita (žljebovi) za hranjenje životinja; rashladni tornjevi s dimnjacima za odvođenje dimnih plinova
7 Beton izložen habanju		
XM 1	Umjereno habanje	Elementi industrijskih konstrukcija izloženi prometu vozila s pneumatskim gumama na kotačima

XM 2	Znatno habanje	Elementi industrijskih konstrukcija izloženi prometu viljuškara s pneumatskim ili s tvrdim gumama na kotačima
XM 3	Ekstremno habanje	Elementi industrijskih konstrukcija izloženi prometu viljuškara s pneumatskim gumama ili čeličnim kotačima; hidrauličke konstrukcije u vrtložnim (uzburkanim) vodama (npr. bazeni za destilaciju); površine izložene prometu gusjeničara

Tab. 2.3.2.2.1::I Razredi izloženosti

Razred izloženosti	Max v/c omjer	Min razred čvrstoće	Min količina cementa (kg/m ³)	Min količina zraka (%)	Drugi zahtjevi
Nema rizika korozije					
X0	-	C 20/25	-	-	-
Korozija armature uzrokovana karbonatizacijom					
XC 1	0.65	C 25/30	260	-	-
XC 2	0.60	C 30/37	280	-	
XC 3	0.55	C 30/37	280	-	
XC 4	0.50	C 30/37	300	-	
Korozija armature uzrokovana kloridima iz mora					
XS 1	0.50	C 30/37	300	-	-
XS 2	0.45	C 35/45	320	-	
XS 3	0.45	C 35/45	340	-	
Korozija armature uzrokovana kloridima koji nisu iz mora					
XD 1	0.55	C 30/37	300	-	-
XD 2	0.55	C 30/37	300	-	
XD 3	0.45	C 35/45	320	-	
Smrzavanje i odmrzavanje					
XF 1	0.55	C 30/37	300	-	Agregat s dovoljnom otpornošću na smrzavanje
XF 2	0.55	C 25/30	300	4.0 ^a	
XF 3	0.50	C 30/37	320	4.0 ^a	
XF 4	0.45	C 30/37	340	4.0 ^a	
Kemijski agresivan okoliš					
XA 1	0.55	C 30/37	300	-	Sulfatno otporni cement ^b
XA 2	0.50	C 30/37	320	-	
XA 3	0.45	C 35/45	360	-	
Beton izložen habanju					
XM 1	-	C30/37	-	-	Manje maksimalno zрно agregata
XM 2	-	C30/37	-	-	
XM 3	-	C35/45	-	-	
a) Kada beton nije aeriran, ponašanje betona treba ispitivati prema prikladnoj metodi u usporedbi s betonom kojemu je otpornost na smrzavanje za relevantni razred izloženosti dokazana.					
b) Kada SO ₄ ²⁻ vodi ka razredu izloženosti XA2 i XA3 ispravno je koristiti sulfatno-otporni cement. Kada je cement razredovan prema sulfatnoj otpornosti, umjereno ili visoko sulfatno otporni cement treba rabiti u razredu izloženosti XA2 (i u razredu izloženosti XA1 kad je primjenljiv), a visoko sulfatno otporni cement treba rabiti u razredu izloženosti XA3.					

Tab. 2.3.2.2.1::II Preporučene vrijednosti sastava i svojstava betona za razrede izloženosti

2.3.2.2.2 Tehnička svojstva i zahtjevi za beton u morskom okolišu

TPBK propisuje tehnička svojstva i druge zahtjeve za beton koji se ugrađuje u betonsku konstrukciju, te način potvrđivanja sukladnosti betona. Tehnička svojstva betona i materijal od kojih se beton proizvodi moraju biti specificirana prema TPBK i normi HRN EN 206-1:2006, te normama specifikacijama za materijale.

Svojstva svježeg betona specificira izvođač betonskih radova, ili su prema potrebi specificirana u projektu betonske konstrukcije. Svojstva očvrslulog betona specificiraju se u projektu betonske konstrukcije. Obavezno se specificira razred tlačne čvrstoće, te ostala

svojstva prema potrebi (otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja, vodonepropusnost i drugo). Time je velika odgovornost dana projektantima.

Trajnost betona direktno ovisi o njegovoj sposobnosti sprečavanja prodiranja supstanci koje uzrokuju degradaciju betona, poput:

- vode – povećava volumen prilikom smrzavanja/odmrzavanja, prenosi ione klorida koji uzrokuju koroziju, reagira s kalcij-dioksidom iz cementa pri čemu nastaje kalcij-karbonat koji snižuje pH vrijednost betona
- klorida – glavni uzročnici korozije
- kisika – potpomaže koroziju čelika
- sulfata – reagiraju s aluminatnim sastojcima.

Projektirati trajni beton znači projektirati beton koji će imati malu propusnost i mali koeficijent difuzije klorida. Mala propusnost betona postiže se odgovarajućom kombinacijom sniženog vodocementnog omjera, njegovanja betona i korištenja sastojaka koji zamijenjuju cement, poput silikatne prašine.

Cement

Za inicijaciju i napredovanje korozije armature presudan faktor je količina i sastav porne vode u betonu. Upravo su zato za korozijski proces jako bitni oni konstituenti betona koji određuju pH vrijednost porne vode, ukupnu poroznost i veličinu pora. Prilikom hidratacije cementa kalcijev silikat reagira s vodom te nastaje kalcij hidroksid $\text{Ca}(\text{OH})_2$, jedan od glavnih uzročnika visoke alkalnosti porne vode. Može se zaključiti da što je veća prisutnost alkalija (CaOH_2 , NaOH i KOH) u cementu, veća je pasivnost armature u betonu, odnosno manja je vjerojatnost pojave korozije.

Razred izloženosti	Tip cementa koji se ne primjenjuje u betonu
XC2, XC3	CEM III/C
XD	CEM IV
XS	CEM V
Svi razredi okoline za elemente betonske konstrukcije s adhezijskim prednapinjanjem	CEM II/AiB-P/Q
	CEM II/AiB-M
	CEM II/AiB-W
	CEM III
	CEM IV
	CEM V

Izbor cementa, u mnogim primjenama, naročito u nepovoljnim uvjetima okoliša ima utjecaj na trajnost betona, morta ili injekcijske mase, npr. otpornost na smrzavanje, kemijsku otpornost i zaštitu armature.

Pri izboru cementa, osobito u pogledu vrste i razreda čvrstoće za različite primjene i stupnjeve izloženosti, treba uzeti u obzir ograničenja za primjenu cementa u betonu prema normi HRN EN 197-1. dana u 2.3.2.2.2.:I.

Tab. 2.3.2.2.2.:I Ograničenja na primjenu cementa u betonu po razredima izloženosti (TPBK 2006)

Dodaci cementu

Posljednjih godina postoji inicijativa za smanjenjem štetnog utjecaja cementne industrije na okoliš i za stvaranjem održive i ekološki zadovoljavajuće industrije cementa, a ujedno i tehnologije betona. Jedno od rješenja kako da se zaštiti okoliš je to da se dio cementa, potrebnog za proizvodnju betona, zamijeni nusproduktima dobivenim iz termoelektrana i metalurške industrije, poput zgure, letećeg pepela ili silikatne prašine. Nedavna istraživanja pokazala su da betoni u čijem je sastavu dio cementa zamijenjen s materijalima poput silikatnog praha, zgure, letećeg pepela i sl. imaju manju propusnost od "klasičnih" betona.

Agregat

Agregat nema velikog utjecaja na koroziju armature u betonu, osim ako je agregat izrazito porozan i/ili sadrži veću količinu klorida. Poroznost cementne paste u okolini zrna agregata je veća od poroznosti ostale cementne paste. Zato je potrebno posvetiti pažnju na veličinu zrna agregata u zaštitnom sloju betona. Ukoliko je veličina zrna agregata približno jednaka debljini zaštitnog betonskog sloja, prodor klorida kroz beton do armature će biti olakšan. Prema *HRN EN 206-1/A1:2004*, tip agregata, granulometriju i razrede obzirom na specificirana svojstva bira se uzimajući u obzir:

- izvedbu radova
- krajnju uporabu betona
- uvjete okoliša kojima će beton biti izložen
- sve uvjete za izloženi agregat ili agregat za završnu obradu betona.

Sadržaj klorida u agregatu

Sadržaj klorida izraženih kao kloridni ioni (Cl^-), ispitan prema *HRN EN 1744-1:2004 Ispitivanja kemijskih svojstava agregata - 1. dio: Kemijska analiza* ne smije biti veći od vrijednosti prikazanih u tablici 2.3.2.2.2::II.

Maksimalni sadržaj kloridnih iona (%)	Namjena
0,15	nearmirani beton
0,06	armirani beton
0,03	prednapeti beton

Tab. 2.3.2.2.2::II

Sadržaj kloridnih iona
ispitan prema HRN EN
744-1

Vodocementni omjer

Poroznost betona i koeficijent difuzije direktno ovise o vodocementnom omjeru. Smanjenje vodocementnog omjera smanjuje poroznost betona, što uzrokuje sporiji prodor klorida i bolju korozijsku pasivnost armature u betonu. Maksimalni vodocementni omjeri za određene razrede okoliša u Tab. 2.3.2.2.1::II.

Pukotine

Pukotine su bitan element trajnosti. Prema EC proračunavaju se u sklopu proračuna uporabljivosti. Proračun se svodi na provjeru graničnog stanja oštećenja po kriteriju da proračunska vrijednost širine pukotine w_k dobivena iz proračuna konstrukcije (u kojem su primijenjeni parcijalni koeficijenti sigurnosti za granično stanje uporabljivosti) mora biti manja ili jednaka od EC-om preporučene granične vrijednosti širine pukotine $w_{max}[mm]$ (za pojedine razrede izloženosti) iz Tab. 2.3.2.2.2::III.

$$w_k \leq w_{max}$$

ZS

Razred izloženosti	Armirani elementi i prednapeti elementi s neprianjajućim nategama $w_{max}[mm]$	Prednapeti elementi s prijanjajućim nategama $w_{max}[mm]$
	Nazovistalna kombinacija opterećenja	Česta kombinacija opterećenja
X0, XC1	0,4 ¹	0,2
XC2, XC3, XC4	0,3	0,2 ²
XD1, XD2, XS1, XS2, XS3		Rastlačenje
NAPOMENA 1	Za razrede izloženosti X0, XC1, širina pukotine nema utjecaja na trajnost i ovo ograničenje je postavljeno da bi se dobio općenito prihvatljiv izgled. U odsutnosti uvjeta za izgled ovaj uvjet se može zanemariti.	
NAPOMENA 2	Za ove razrede izloženosti, dodatno treba kontrolirati rastlačenje za nazovistalnu kombinaciju opterećenja.	

Tab. 2.3.2.2.2::III Preporučene granične vrijednosti širine pukotina betona $w_{max}[mm]$ za razrede izloženosti prema EN 1992-1-1 ZS

Progibi

Element konstrukcije	(Maksimalni) dopušteni progib
Grede, ploče ili grede s prepustima (nazovistalna kombinacija opterećenja)	$L_{\text{eff}} / 250$
Ploče ravnog krova. Ploče ili grede na kojima su postavljeni pregradni zidovi neposredno nakon izvedbe. Opasnost od oštećenja pregradnih zidova zbog progiba.	$L_{\text{eff}} / 500$
Ploče ili grede na kojima su naknadno izvedeni pregradni zidovi.	$L_{\text{eff}} / 250 + L_{\text{eff}} / 500$

Tab. 2.3.2.2.2::IV Granične vrijednosti progiba δ_{max} [mm] Bet.-konstr., JR/drugi, 486

Progibi su bitan element uporabljivosti, ali i trajnosti. Prema EC proračunavaju se u sklopu proračuna uporabljivosti. Proračun se svodi na provjeru graničnog stanja deformacije po kriteriju da proračunska vrijednost progiba δ_k dobivena iz proračuna konstrukcije (u kojem su primijenjeni parcijalni koeficijenti sigurnosti za granično stanje uporabljivosti) mora biti manja ili jednaka od EC-om preporučene granične vrijednosti progiba betonskih nosača δ_{max} [mm] iz Tab. 2.3.2.2.2::IV.

$$\delta_k \leq \delta_{\text{max}}$$

Sadržaj klorida u betonu

Porijeklo klorida u betonu može biti iz samih sastojaka betona (u agregatu ili vodi) te iz okoline, uslijed djelovanja mora ili soli za odmrzavanje. Ako je sadržaj kloridnih iona dostatan (veći od kritične koncentracije), može doći do razaranja pasivnog zaštitnog sloja i početka procesa korozije. Sadržaj klorida u betonu izražen kao postotak kloridnih iona na masu cementa, ne smije prijeći vrijednosti dane za odabrani razred sadržaja klorida u tablici Tab. Tab. 2.3.2.2.2::V.

Uporaba betona	Razred sadržaja klorida ^a	Najveći sadržaj Cl^- na masu cementa ^b
Ne sadrži čeličnu armaturu ni drugi ugrađeni metal osim nehrđajućih vodicica	CI 1,0	1,00 %
Sadrži čeličnu armaturu ili drugi ugrađeni metal	CI 0,20	0,20 %
	CI 0,40	0,40 %
Sadrži čelik za prednapinjanje	CI 0,10	0,10 %
	CI 0,20	0,20 %

^a U određenim uvjetima uporabe betona izbor razreda ovisi o odredbama važećim na mjestu uporabe betona.

^b Pri rabljenju mineralnih dodataka tipa II koji su uključeni u proračun količine cementa, sadržaj klorida se izražava kao postotak kloridnih iona na masu cementa plus ukupna količina uračunatog mineralnog dodatka.

Tab. 2.3.2.2.2::V Najveći dozvoljeni sadržaj klorida u betonu

Kemijski dodaci betonu

Tehnička svojstva kemijskih dodataka betonu moraju ispunjavati opće i posebne zahtjeve bitne za svojstva betona prema normama HRN EN 934-2, nHRN EN 934-5, *Dodaci betonu, mortu i mortu za injektiranje - 2. dio: Dodaci betonu - Definicije, zahtjevi, sukladnost, označivanje i obilježavanje* normama na koje te norme upućuju i na temelju odredbi *Priloga E* i to ovisno o vrsti dodatka betonu, za sljedeće tipove dodataka:

- plastifikator
- superplastifikator
- dodatak za zadržavanje vode
- aerant
- ubrzivač vezivanja
- ubrzivač očvršćivanja
- usporivač vezivanja
- dodatak za vodonepropusnost
- usporivač vezivanja/plastifikator
- usporivač vezivanja/superplastifikator
- ubrzivač vezivanja/superplastifikator
- ubrzivač vezivanja/plastifikator
- ubrzivač vezivanja mlaznog betona
- ubrzivač vezivanja mlaznog betona bez sadržaja alkalijs
- dodatak za kontrolu konzistencije mlaznog betona
- dodatak za poboljšanje veze slojeva mlaznog betona
- dodatak za betoniranje pri niskim temperaturama*

Zaštitni sloj za antikorozivnu zaštitu armature u betonu

Jedna od glavnih mjera zaštite od korozije armature, ali i povećanja trajnosti, je ostvarivanje kvalitetnog betona u zoni zaštitnog sloja, te projektiranje i izvedba dovoljne debljine zaštitnog sloja. Minimalna debljina zaštitnog sloja betona utvrđuje se u ovisnosti o razredu izloženosti te načinu armiranja elementa. U Tab. 2.3.2.2.2::VI dane su najmanje vrijednosti debljine zaštitnog sloja betona c_{min} za zaštitu od korozije armature i dopuštena odstupanja zaštitnog sloja. Za istovremene utjecaje više razreda izloženosti mora se usvojiti zahtjev većeg zaštitnog sloja.

Razred izloženosti	Najmanji zaštitni sloj c_{min} (mm) ^{a)} ^{b)} za armaturu	Dopuštena odstupanja zaštitnog sloja Δc (mm)
XC1	20	10
XC2	35	15
XC3	35	
XC4	40	
XD1	55	
XD2		
XD3 ^{c)}		
XS1	55	
XS2		
XS3		

^{a)} Ako su elementi izvedeni od betona za dva razreda više od najmanjeg razreda specificiranog u tablici 2.25, zaštitni sloj može se smanjiti za 5 mm. Ovo, međutim, ne vrijedi za razred izloženosti XC1.

^{b)} Ako se beton na mjestu (in-situ) veže s betonom predgotovljenog elementa, zaštitni sloj na tom spoju može se smanjiti do 5 mm u predgotovljenom elementu i do 10 mm u betonu na mjestu. Ipak, pravila specificirana u Prilogu H TPBK, za osiguranje prijanjanja moraju se poštivati ako je armatura potpuno iskorištena u fazi izvedbe. ^{c)} U nekim slučajevima armatura će trebati posebnu zaštitu od korozije.

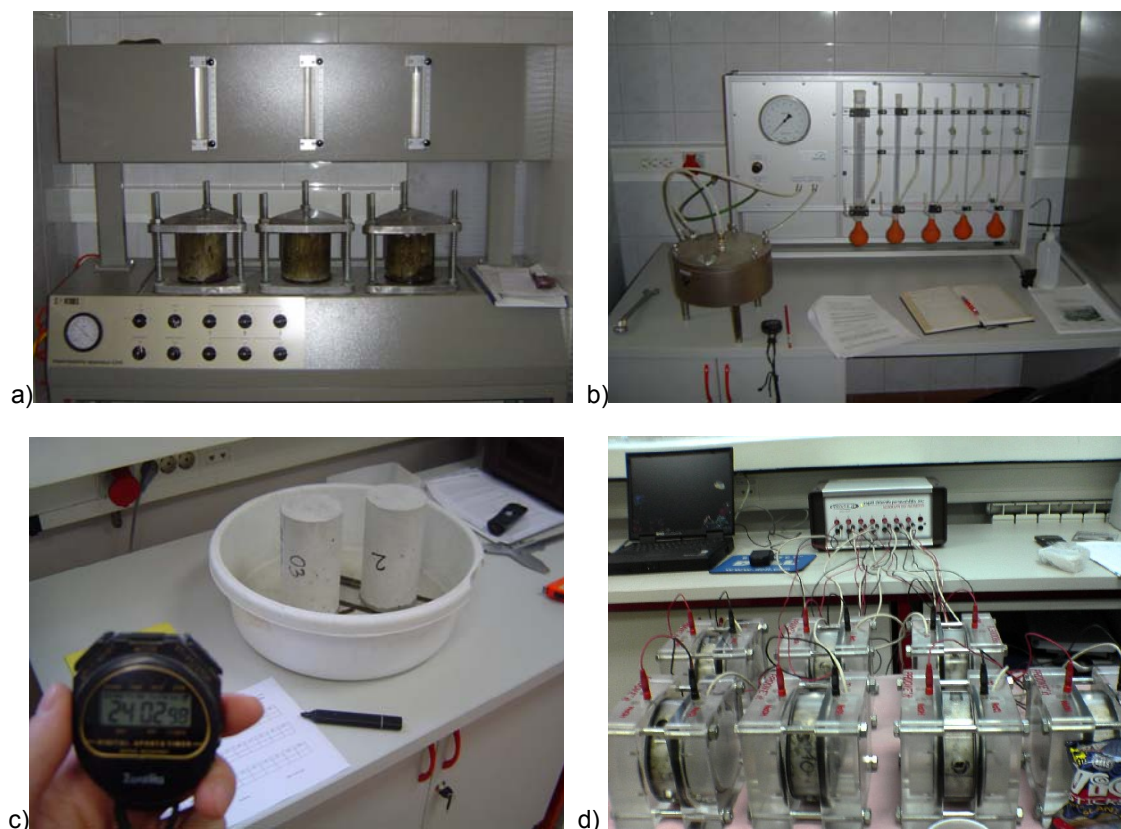
Tab. 2.3.2.2.2::VI Najmanje vrijednosti zaštitnog sloja

2.3.2.2.3 Određivanje trajnosnih svojstava betona

Prilikom projektiranja novih betonskih konstrukcija odnosno sastava betona svojstva očvrstnalog betona moraju biti specificirana u projektu betonske konstrukcije ovisno o uvjetima njezine uporabe.

Propusnost betona

Trajnost betona, armiranog i prednapetog betona prije svega je određena mogućnošću penetracije agresivnih tvari iz okoliša u unutrašnjost elementa. Iz tog razloga su svojstva apsorpcije, difuzije i tečenja fluida pod pritiskom, kroz poroznu strukturu cementnog kamena osnovni parametri koje treba poznavati za



Slika 2.3.2.2.3::1 Ispitivanje: a) vodopropusnosti, b) plinopropusnosti, c) kapilarnog upijanja, d) difuzije klorida

procjenu potencijalne trajnosti armiranobetonske konstrukcije. Prisutnost vode odnosno vlage je najvažniji faktor koji utječe na mehanizme oštećenja (degradacije), osim mehaničkih oštećenja. Transport vode unutar betona je određen vrstom, veličinom i distribucijom pora, te postojanjem mikro i makropukotina. Iz toga proizlazi da je kontroliranje nastanka i distribucije pora i pukotina esencijalno za trajnost materijala. Tvari koje prodiru u beton i uzrokuju degradaciju osnovnog materijala, mogu prodirati na više načina, a uglavnom se radi o četiri osnovna transportna mehanizma: kapilarno upijanje, propusnost, difuzija i migracija.

Kao što je čvrstoća materijala osnovni parametar mehaničkih svojstava tako je propusnost materijala (vodopropusnost, plinopropusnost, difuzija kloride ili propusnost nekih drugih kemijski agresivnih supstanci) osnovni parametar trajnosnih svojstava materijala. Jednako kao što vrijedi za čvrstoću materijala da je jasno definirana, fizikalno objašnjiva,

eksperimentalno lako izračunana i prema izračunanoj vrijednosti jednostavno ocjenjena, jednako vrijedi i za svojstva propusnosti.

LITERATURA

Bentur, A.; Diamond, S.; N.S. Berke: *Steel Corrosion in Concrete*, E & FN Spon, UK, 1997.

Bertolini, L.; Elsener, B.; Pedferri, P.; Polder, R.: *Corrosion of Steel in Concrete*, WILEY-VCH, 2004

Bjegović, D.: Projektiranje betonskih konstrukcija u kemijski agresivnoj okolini, Disertacija, Fakultet građevinskih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 1991.

Mehta, P.K.: *Concrete: Structure, Properties and Materials*, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1986.

Radić, J. i sur. *Betonske konstrukcije Priručnik*, Sveučilište u Zagrebu – Građevinski fakultet, Zagreb, 2006.

Rosković, R., Bjegović, D. Role of mineral additions in reducing CO₂ emission *Cement and Concrete Research*. 35 (2005) , 5; 974-978 (članak, znanstveni rad).

Rostam, S.: CEB Design Guide and the DuraCrete Design manual, DuraNet/CEN TC 104 Workshop, Berlin, 1999.

Stipanović, I.: Proračun uporabnog vijeka armiranobetonskih konstrukcija izloženih djelovanju klorida, Magistarski rad, Zagreb, 2005 god.

Tehnički propis za betonske konstrukcije, NN br. 101/06.

www.corrosioncost.com, www.flyash.com, <http://www.silicafume.org>

2.3.3 UGRADBA BETONA POD VODOM

Ugradnja pod vodom temelji se na činjenici da za stvrdnjavanje nije potreban zrak. Dapače; stvrdnjavanje je jednako ili bolje pod vodom. No pošto pod vodom nije moguće vibriranje (zbog ispiranja cementa vodom), svježi beton za podmorsko betoniranje mora biti dovoljno tekuć i samozbijajuć da potpuno ispunji kalup. Stoga naročitu pažnju treba posvetiti glavnoj fazi betoniranja: ugradbi betona. Pritom se beton ne smije razmiješati t.j. vodom razjediti i isprati. Da se to nebi desilo osnovno je pravilo da beton ne smije slobodno padati kroz vodu: t.j. betonska masa na putu ugradnje ne smije dolaziti direktno u dodir s vodom. Kad bi se beton slobodno sipao direktno kroz vodu brzo tonjenje betona ispiralo bi sitne čestice betonske mase, prvenstveno cementa, t.j. razjedinilo svježi beton na agregat i cement. Potom bi se na dno kalupa najprije nataložila najkrupnija granulacija; t.j. na dnu kalupa ostao bi čisti agregat. Na njemu bi se nakon relativno dugog razdoblja slegao rahli cement.

Postoji nekoliko isprobanih načina ugradbe betona pod morem (Sl. 9.1.2-4::1):

- a) Betoniranje na p l i ć a k u (do 1 m dubine) izvodi se istresajući beton na suhom (gomila iznad vode) koji onda svojim tlakom porinjava pokos betona prema naprijed i tako betonska masa postepeno ispunjava cijeli profil. U kontaktu s vodom uvijek je ista površina betona tako da se preostala masa neće isprati.

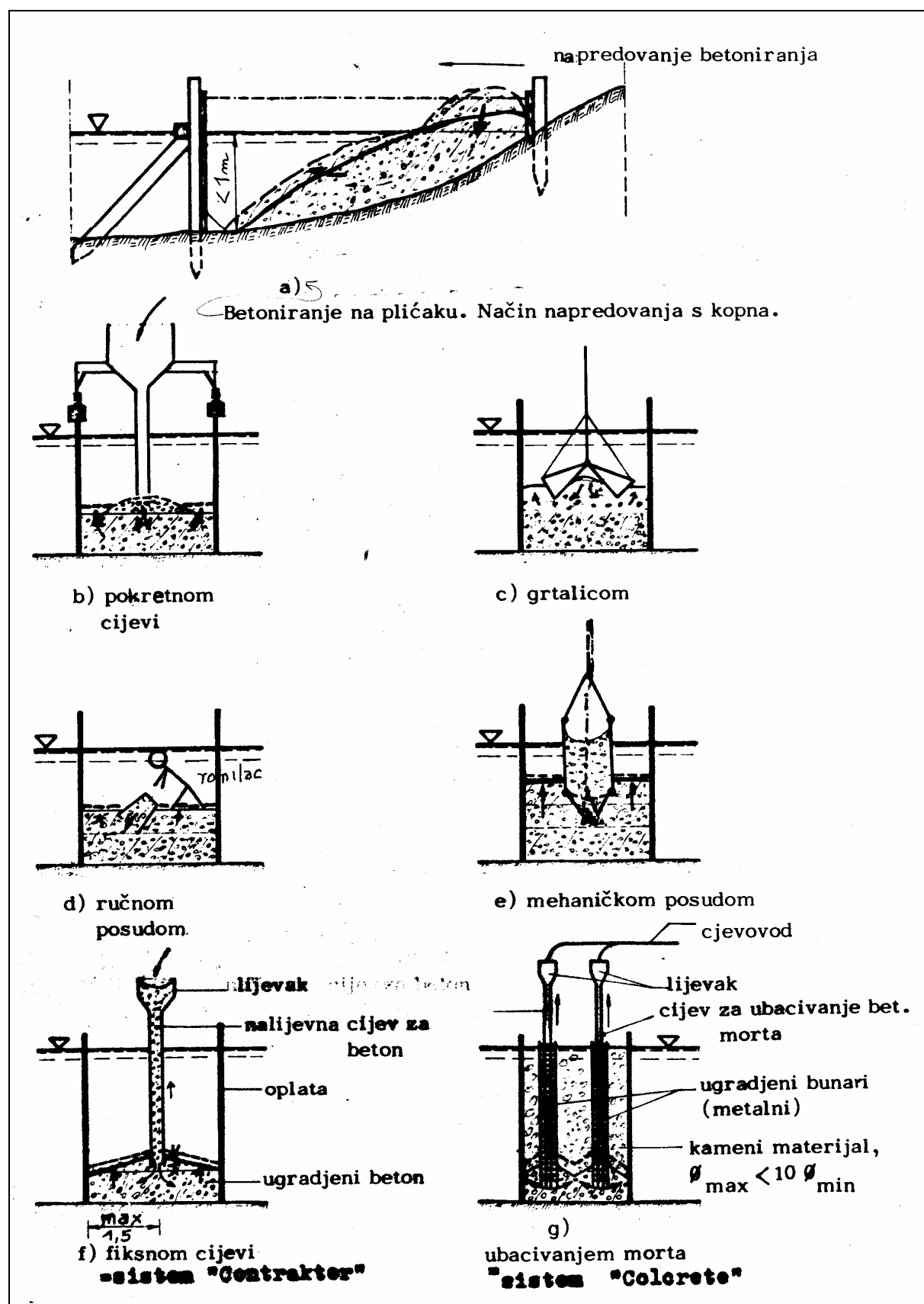
- b) P o k r e t n a cijev radi po principu kontraktora (vidi f) a služi za podvodno betoniranje ploča u slučajevima kad se ne postavlja veliki zahtjev na kvalitet podvodnog betona.
- c) Dizalična g r t a l i c a može se upotrijebiti u slučajevima betoniranja masivnih presjeka kad se ne postavlja veliki zahtjev na kvalitet podvodnog betona.
- d,e) Ručna p o s u d a ili betonski s i l o s sa svježim betonom treba biti prednjim krajem utisnut u beton. Tek tako uronjena posuda se istresa ili otvara pa istreseni beton ne dolazi u prevelik dodir s morem, a nivo betona u oplati se penje.
- f) "C o n t r a k t o r" sistem je opće priznat po švedskom građ. poduzeća Contractor koje ga je prvo primijenilo. U engleskoj literaturi koristi se termin "tremie" (dolazi od franc. tremie=lijevak [1]). Bazira se na čeličnom lijevku navarenom na vertikalnu cijev, kontraktoru, koji pokriva određenu plohu (promjer djelovanja) za betoniranje. Uobičajeni promjer kontraktorske cijevi je 8 do 12×maksimalni promjer zrna agregata, što obično iznosi 250mm [1]. Betoniranje se vrši sipanjem svježeg betona u lijevak kontraktora nad vodom. Beton iz lijevka u kalup (oplatu) putuje prema dolje kroz cijev kontraktora (koja uvijek mora biti puna betona) tako da slobodno ne pada kroz vodu. Cijev kontraktora uvijek je svojim vrhom barem 0,5m uronjena u prethodno ugrađenu masu svježg betona [1]. Kod prvog punjenja cijev ja na donjem kraju zabrtvljena nekon vrstom "lopte" koja se na početku betoniranja izvuče lančićem. Svježi beton iz vrha kontraktora istiskuje se tlakom stupca betona nasutog u kontraktor. Mali presjeci betoniraju se pojedinačnim kontraktorom, a veliki grupom kontraktora koji su na razmaku 4-6m [1]. Razmak pojedinačnog kontraktora od oplata i međusobni razmak grupe kontraktora ovisi o promjeru rasprostiranja svježeg betona koji je 3 – 4m [PM]. Nagib površine svježeg betona je 1:6 za pojedinačni kontraktor, a 1:9 za grupu kontraktora [1]. Promjeri rasprostiranja se moraju preklapati tako da sav tlocrt kalupa bude prekriven krugovima rasprostiranja svježeg betona. Betoniranje po visini napreduje tako da se cijev lagano povlači prema gore (bez horizontalnih pomaka) kako se u oplati diže razina betona. U kontaktu s morem uvijek je samo gornja površina betonske mase. Kad beton izađe iznad vode završava se podmorsko betoniranje, a nakon završenog vezivanja, gornji slabi (isprani) sloj betona se obije kako bi se nadmorsko betoniranje nastavilo na kvalitetan podmorski beton.

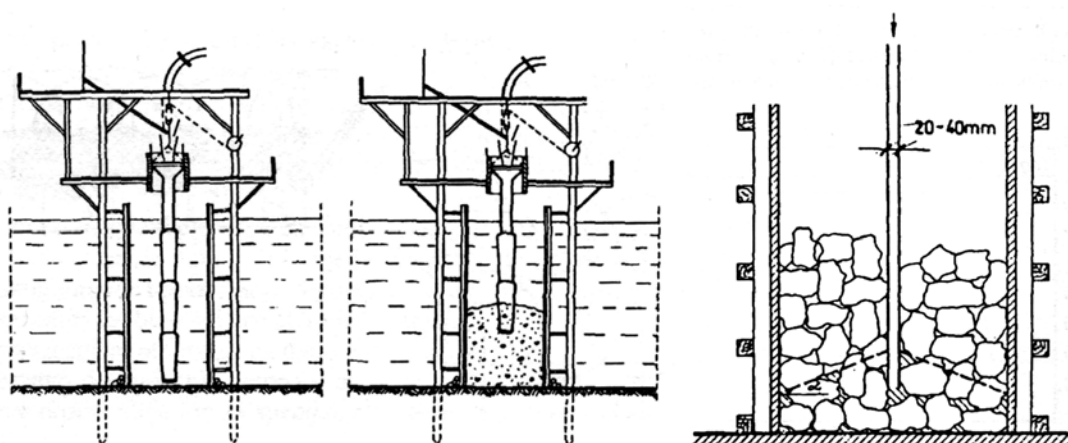
Sličan sistem je holandski "vodni ventil" (engl. Hydrovalve). Služi za betoniranje tankih konstrukcija (b. i a.b ploča do 0,75m debljine) horizontalnim vođenjem amortamo. Vodni ventil ispod čeličnog lijevka umjesto čelične cijevi ima fleksibilnu cijev od tkanog materijala na čijem je kraju opet čelična cijev. Kad betona nema u lijevku

cijev je sploštena od vodenog tlaka, a kad beton teče cijev je uvijek dobro priljubljena uz beton i nema ispiranja cementa. Njen donji kraj nije uronjen u beton nego je na željenoj razini buduće gornje površine betona [1].

- g) "C o l c r e t e" sistem (inozemna licenca). U engleskoj literaturi koristi se termin "Grouted aggregates"=injektirani agregat, ili "Pre-placed aggregate concret"=beton od prethodno postavljenog agregata. Podrazumijeva ugradnju agregata (bez cementa) u oplatu i potom injektiranje cementnog morta u agregat kako bi se agregat povezao u betonsku masu. Agregat je uniformne granulacije (jednozrnat) Betoniranje započinje sipanjem agregata u oplatu. U ukupnom volumenu betona agregata je 65 - 70%, a morta 35 - 30%. Prije sipanja agregata postave se u oplatu "zdenci" od armature na razmaku $\leq 1,5\text{m}$, a prilikom sipanja agregata zdenci se ne pune agregatom. Potom se kroz zdence injektira pogodan cementni mort u šupljine agregata. Maksimalni $\varnothing$ zrna pijeska u mortu treba biti manji od 1/10 minimalnog $\varnothing$ zrna agregata. Oprema za injektiranje bazira se na vertikalnim injekcijskim cijevima (kontraktori manjeg promjera) koje su uronjene u "zdence" od armature. Zdenci pokrivaju određeni promjer injekcije za betoniranje. Injektiranje se vrši tlakom stupca cementnog morta u injekcijskoj cijevi. Betoniranje po visini napreduje tako da se cijev lagano povlači prema gore kako se u oplati diže razina cementnog morta.

Modernija je varijanta injektiranje pumpom. Tada se umjesto armaturnih zdenaca u agregat postave vertikalne čelične injekcijske cijevi gotovo do dna kalupa, a injekcijska smjesa se kroz njih tlači u agregat pumpom. Pritom se injekcijske cijevi (za razliku od kontraktorskih injekcijskih cijevi) ne povlače prema gore kako razina injekcijske mase u kalupu raste. Razmak injekcijskih cijevi je oko 2m. Tipična injekcijska smjesa (injekcijski mort) sastoji se od mješavine veziva (portland i pucolanski cement u masenom omjeru 2,5:1 do 3,5:1) i pijeska u masenom omjeru 1:1 do 1,5:1. Vodocementni omjer injekcijske smjese je $v/c=0,42$ do 0,5. U mješavinu se može dodati i kemijski dodatak za injekcijske smjese (intrusion aid) koji pospješuje protočnost, i smanjuje segregaciju te povećava koheziju. Ovaj dodatak malo usporava vezivanje, što omogućuje dulju obradivost injekcijske smjese, te sadrži i malo aluminijskog praha koji lagano povećava volumen prije okončanja stvrdnjavanja. Ovaj način betoniranja daje veće čvrstoće betona nego drugi; redovito preko 40 MPa.





Sl. 9.1.2.-4.:1 Ugradba betona pod vodom

- h) Rešetkasti lift (engl. Skip=rešetkasti rudarski lift) služi za betoniranje tankih konstrukcija. Može raditi i deblje ako se usta rešetkastog lifta ukopaju u ranije postavljen svježi beton. Lift se sastoji od dvije polovice velikog limenog kalupa (kao pekarska posuda za pečnicu) koja se napuni i poravnaju na suhom, te prekrije s dvije poplovice PVC folije koje se nalijepe na beton i strše preko ruba kalupa. Folije sprečavaju ispiranje betona jer ostaju nalijepljene na beton prilikom potapanja kalupa, ali i prilikom istresanja betona. Istresanje se vrši tako da se kalup spusti na dno i potom se krajevi podižu dok rascjep na sredini ostaje na dnu. Time se svaka polovica kalupa nagne pa beton počne curiti po dnu. Istovremeno se polovice kalupa razmiču tako da se beton razastre po dnu u jednoličnoj debljini. Najbolja je varijanta rešetkastog lifta s vertikalnim vodilicama i "suknjicom" koja minimizira miješanje betona s vodom. [1].
- i) Betonpumpa je idealna za ugradnju betona pod morem jer je sastav i konzistencija podmorskog betona slična pumpanom betonu. Dubina betoniranja je oko 30m. Princip betoniranja je kao s kontraktorom; no operator pumpe nema tako dobar osjećaj kao operater kontraktora. Cijev pumpe pod vodom je pod kutem prema horizontali, pa stoga nije kontrolabilna kao cijev kontraktora. Bitno je sprečavanje njenog horizontalnog pomicanja [1].
- j) Vreće s patent čvorom se koriste kad je potrebno malo betona kao na pr. kod popravaka podmorskog betona. Nepropusna vreća se napuni betonom na suhom i zaveže užetom jednim patent čvorom. Vreća se na konopu spusti na mjesto ugradnja, potezom za konop razriješi čvor i potom beton kao pasta za zube istisne u prethodno priređenu kavernu u starom betonu. Sve to obavlja ronilac pod vodom, uz skupi sat ronjenja [1].

- k) Jutene vreće (10 do 20l) napune se dopola plastičnim betonom, zavežu nerazvezivo i polože na željeno mjesto pomoću ronioca. Polupune plastične vreće mogu se dobro prilagoditi kod međusobnog slaganja ili ispunjavanja nekog oblika. Cementna pasta prije očvršćavanja betona prodiru kroz jutu u drugu vreću i beton se poveže. Ovo je zgodno kod pravljenja podmorskih oslonaca za šuplje betonske blokove, jer se vreće daju dobro nivelirati na željenu visinu. Ronioci više vole baratati s suhom mješavinom cementa i agregata (suhomiješani beton), a kod ugradnje povezivati vreće stavljajući žbuku među vreće. To ne daje dobre rezultate, jer se suhomiješani beton se nikad potpuno ne namoći probijanjem dovoljne količine vode za hidrataciju cementa pa ne očvrstne potpuno, a kontaktne površine među vrećama su minimalne [1].
- l) Podvodne injektirane vreće i madraci koriste se kao elementi zaštite od erozije, ispiranja od broskog vijka i probijanja vode. Sastoje se od dvoslojnog propusnog tkanog materijala povezanog koncem. Sekcije se međusobno spoje, polože prazne na pokos ispod i iznad vode i potom ispune pumpanim betonom. Radi ojačanja vreće se mogu prošiti čeličnim kabelom ili užetom kako bi se osigurala cjelovitost nakon slijegavanja i pokotina od skupljanja betona [1].

Literatura

- [1] Newman John i Ban Seng Choo: Advanced Concrete Technology, Elsevier, Amsterdam, 2003

2.4 POMORSKI RADOVI

Pomorski radovi u užem smislu obuhvaćaju građenja na moru, uz more i pod morem. Osobitosti građenja u moru su.

- Faze gotove konstrukcije treba zaštititi (projekt konstrukcije mora to uzeti u obzir) od moguće valne nepogode.
- Tehnologija građenja pod vodom odbacuje "zidanje" filigranskim elementima već se gradi montiranjem velikih blokova ili elemenata. Ovo zahtijeva mehanizirani rad. Velika mehanizacija isplati se samo kod obimnih gradnji.
- Nasipi se ne grade od "zemlje" već od (stabilnijeg) kamena, ili betonskih elemenata kad se radi o vrlo krupnim granulacijama elemenata (preko metra).
- Kose, valovima izložene obale ne oblažu se glatkim ploham već hrapavom "školjerom", tj. većim kamenjem ili teškim betonskim blokovima,
- Općenito treba težiti da se što više radi s kopna.

2.4.1 PODMORSKI ISKOPI

Ovi iskopi su, zbog okolnosti pod kojima se vrše (voda, iznenadne oluje, nevidljivo dno, iznenađenja u dnu, smetnje od plovidbe i sl.), mnogo skuplji od onih na kopnu. Obuhvaćaju: razrivanje, vađenje razrivenog materijala iz mora, transport i deponiranje.

Obzirom na stupanj razrivanosti tla, iskopi se dijele na kategorije iskopa

- A – srasla stijena,
- B – miješana zemlja i stijena i
- C – zemljani materijal (C, S, G).

2.4.1-1 PODMORSKI ISKOP RAZRIVNOG TLA

Razrivna tla pripadaju u C kategoriju. Sredstva za iskop razrivenih tala su:

- a) (poznata) kopnena mehanizacija koja može kopati pod vodom sa kopna i sa mora, pomoću kopnenog radnog stroja ukrcanog na plovilo, ili
- b) plovna mehanizacija. Ima mnogo tipova, a mogu se svrstati u dvije grupe: periodični i kontinuirani. Sl. 2.4.1-1::1.

Od periodičnih plovnih strojeva za iskop najpoznatiji su:

- grtalličar,
- povlačni jaružar (sa skreperskom žlicom) i
- žličar.

Od kontinuiranih plovnih strojeva za iskop najpoznatiji su

- vedričar
- fiksni sisavac ili refuler
- plovni sisavac ili hopper.

2.4.1-2 PODMORSKI ISKOP NERAZRIVNOG (TVRDOG) TLA

Neazrivna tla pripadaju u A i B kategoriju. Razrivanje se može vršiti na tri načina:

- podvodnim (pneumatskim) ručnim bušenjem rupa i miniranjem
- nadvodnim strojnim bušenjem rupa i miniranjem
- razbijanjem tvrdog tla (uslojene hridi) pomoću teškog bata obješenom na grani

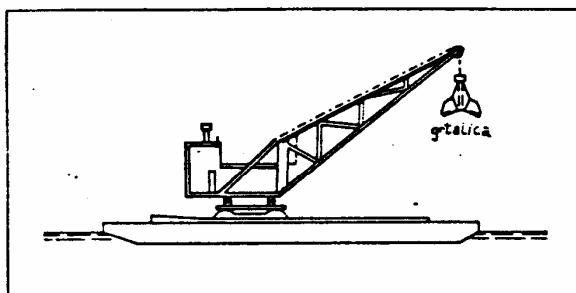
plovnog bagera.
Iskop srasle stijena na manjoj dubini može se vršiti i bez razrivanja: mehaničkom trezom.

2.4.2 NASIPI U MORU

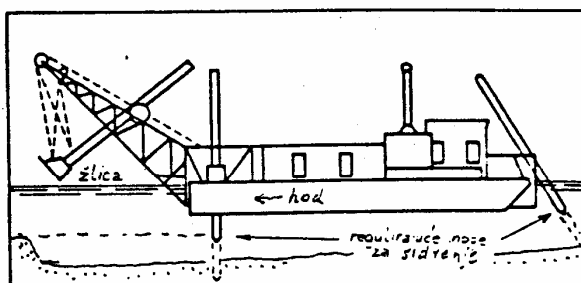
2.4.2-1 KAMENI MATERIJAL

Za nasipe se redovno upotrebljava samo kameni materijal jer je uslijed uklještenosti i težine otporan na ispranje (eroziju) od strujanja mora uslijed valova i morskih struja.

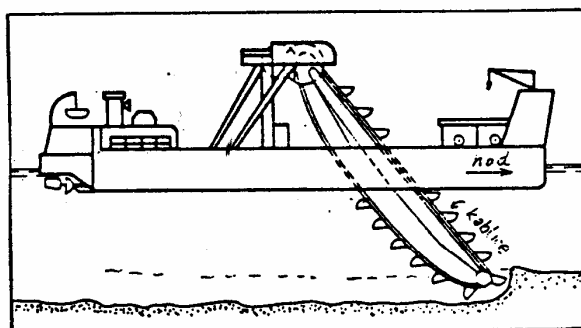
Kategorije kamena (Sl. 2.4.2-1::1) određuju se prema zastupljenosti mase pojedinih komada; t.j. (granulometrijskoj krivulji. Težina se uzima kao mjerilo za otpor strujanju mora, a otpornije su nasipi usko graduirane granulometrije.



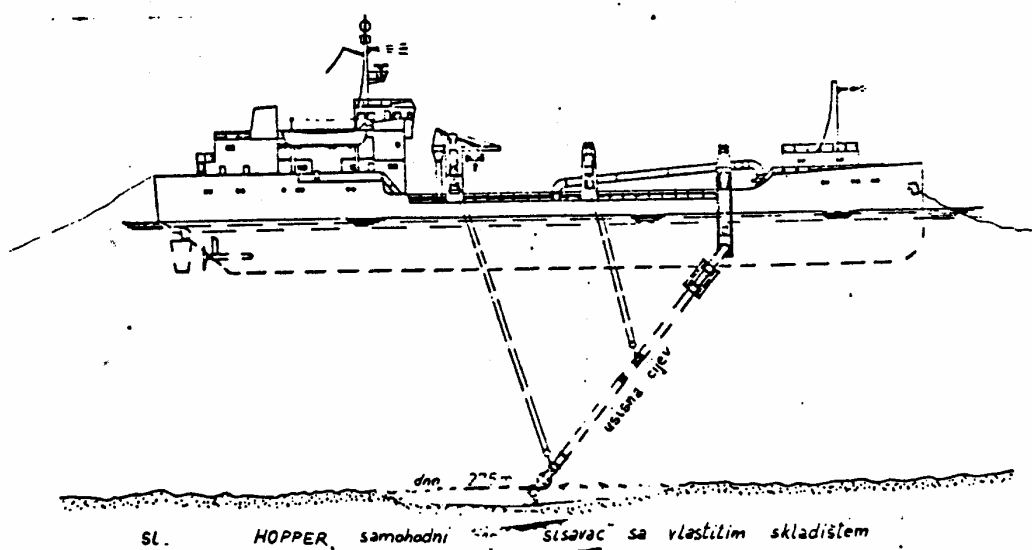
Sl. GOTALIČAR



Sl. ŽLIČAR

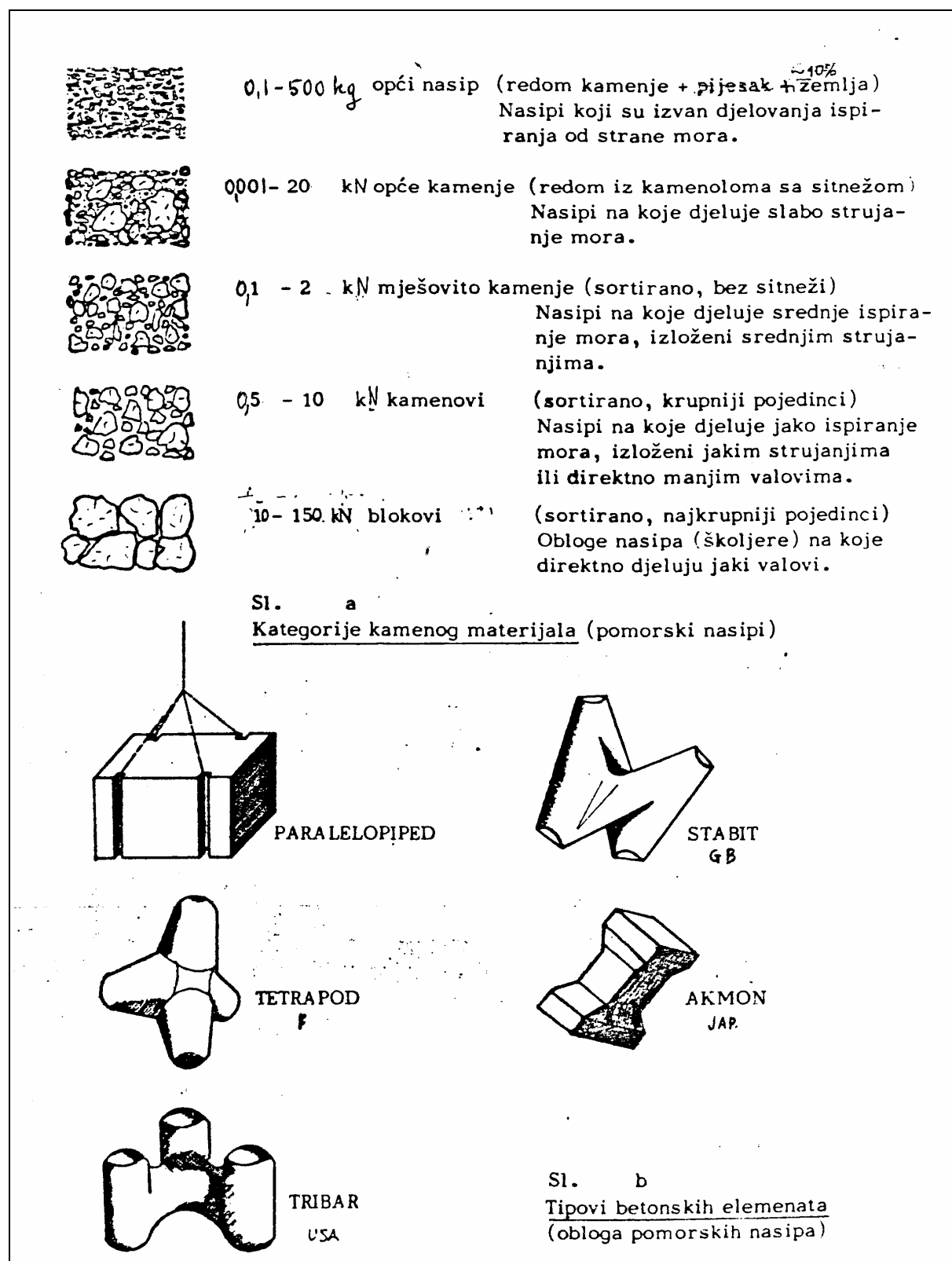


Sl. KABLIČAR



Sl. HOPPER, samohodni "sisavac" sa vlastitim skladištem

Sl. 2.4.1-1::1 Pomorska plovna mehanizacija za iskop



Sl. 2.4.2.-1::1 Kategorije kamena (Sl. a) i glavni tipovi betonskih blokova za oblaganje podmorskih nasipa (Sl. b)

2.4.2-2 BETONSKI MATERIJAL ZA NASIPNE RADOVE

Za oblogu ("školjeru") podmorskih kamenih nasipa danas se sve više, uslijed teškog nabavljanja kamenih blokova, upotrebljavaju betonski blokovi. Još više se betonski blokovi paralelopipednog oblika zamjenjuju specijalno oblikovanim elementima (manje težine od paralelepipednih blokova, ali međusobno jako uklještenim) kako bi utrošak osnovnog materijala bio što manji, ugradba što lakša i efekt školjere što veći (manja refleksija i veća amortizacija valova, a time manje prelijevanje). Danas postoje mnogi patentirani tipovi takvih elemenata. (Sl. 2.4.2-1::1).

2.4.2-3 TRANSPORT MATERIJALA ZA NASIPNE RADOVE

Prvenstveno treba nastojati da se materijal za nasip prevozi kopnom, jer je to ekonomičnije, brže i neovisno o stanju mora. Ako je dubina mora mala (do 2 m) onda je to i jedini mogući način da se direktno spoji transport + ugradba s kopna. Ugrađuje se iskretanjem vozila s čela ili sa strane. Transport morem je na više načina u kombinaciji s ugradnjom. Indirektno iz maona ili platformi pomoću dizalica (grtalica) utovarivača ili konvejera, a direktno prevrtaljkama ili klapetama. Ove posljednje zahtijevaju nešto veću dubinu kod istresanja (Sl. 2.4.2-3::1).

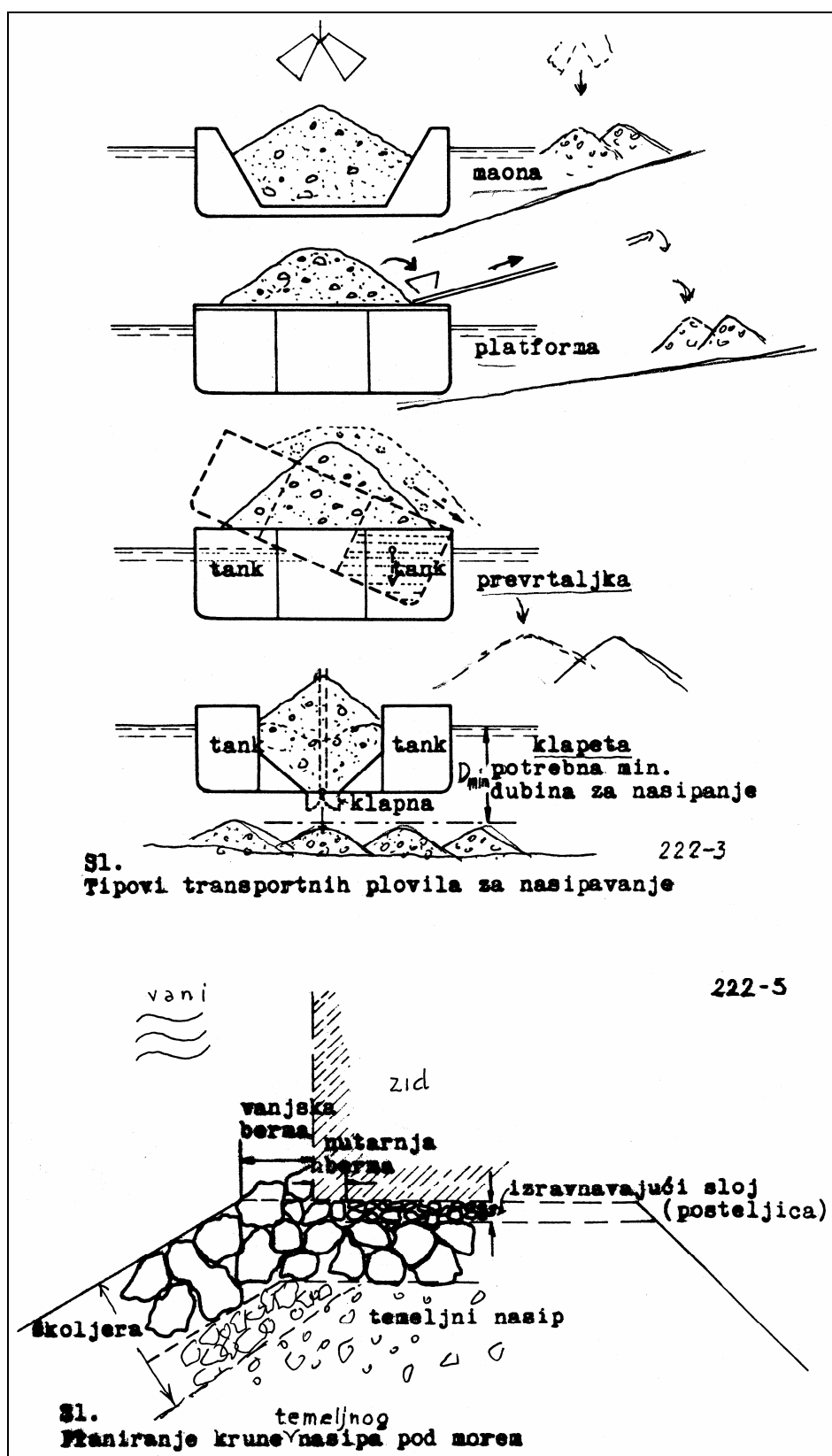
2.4.2-4 UGRADBA MATERIJALA ZA NASIPNE RADOVE

Može se izvršiti na tri načina, obzirom na veličinu kamena i željenu strukturu nasipa:

- a) nasipavanje, istresanje općeg materijala u profil nasipa bez naročitog reda;
- b) nabačaj, istresanje krupnijeg kamenog materijala po projektnom profilu i sa ciljem da se dobije projektirana figura nasipa;
- c) kamenomet, slaganje (metanje) vanjske obloge nasipa na način da se dobije struktura "školjere".

2.4.2-5 PLANIRANJE POD MOREM

Postava prefabriciranih betonskih blokova pod more pretpostavlja ravnu podmorsku temeljnu posteljicu na vrhu podmorskog temeljnog nasipa (Sl. 2.4.2-3::1). Kod nasipavanja temeljnog nasipa pod morem mora se jasno odijeliti donji dio temeljnog nasipa (koji je grubo nasipan, tolerancija ± 15 do 25 cm) i gornji dio na koji neposredno naliježe (betonska) konstrukcija. Taj gornji dio mora se najprije grubo planira i kad je to dovršeno, vrši se postava i niveliranje dva paralelno postavljena teška čelična profila koji su na



Sl. 2.4.2-3::1 a) Plovila za transport materijala za nasipne radove i ugradnja nasipa pod morem, b) Uređenje podmorskog temeljnog nasipa prije postavljanja prefabriciranih betonskih blokova pod more

razmaku širine batonskog elementa koji se ima temeljiti. Između profila se presipa sloj 30 do 50 cm tucanika; t.zv. podmorska temeljna posteljica. Potom se vrši fino planiranje da bi se dobila ravna horizontalna ploha temeljne posteljice. Samo planiranje vrše bar 2 ronioca pomoću trećeg teškog čeličnog profila koji kliže popreko dva ranije postavljena. Klizanje trećeg profila obavlja se popvlačenjem uz pomoć dizalice. Tolerancija visine tucaničke posteljice (centimetarske veličine) ovisi o važnosti i veličini konstrukcije.

2.4.3 BETONSKE PODMORSKE KONSTRUKCIJE

2.4.3-1 PODMORSKI KALUPNI BETON

Betonira se u oplati (Sl. 2.4.3::1), na licu mjesta. Oplata zidova se izrađuje na kopnu u formi većih tabli koje se, ako su drvene, opterećuju balastom, potapljaju u položaj i kosnicima pod morem osiguravaju protiv bočnog pomicanja. Gornja kota podmorskog betona obično je iznad SVVŽR kako bi se nadmorski zid mogao nastaviti betonirati na suhom u svako vrijeme morske mijene. Prije nastavka nadmorskog betoniranja treba nekvalitetan beton na gornjoj plohi podmorskog bet. odstraniti. Ovaj način betoniranja moguć je samo u zaštiti lukobrana kako valovi ne bi srušili oplatu.

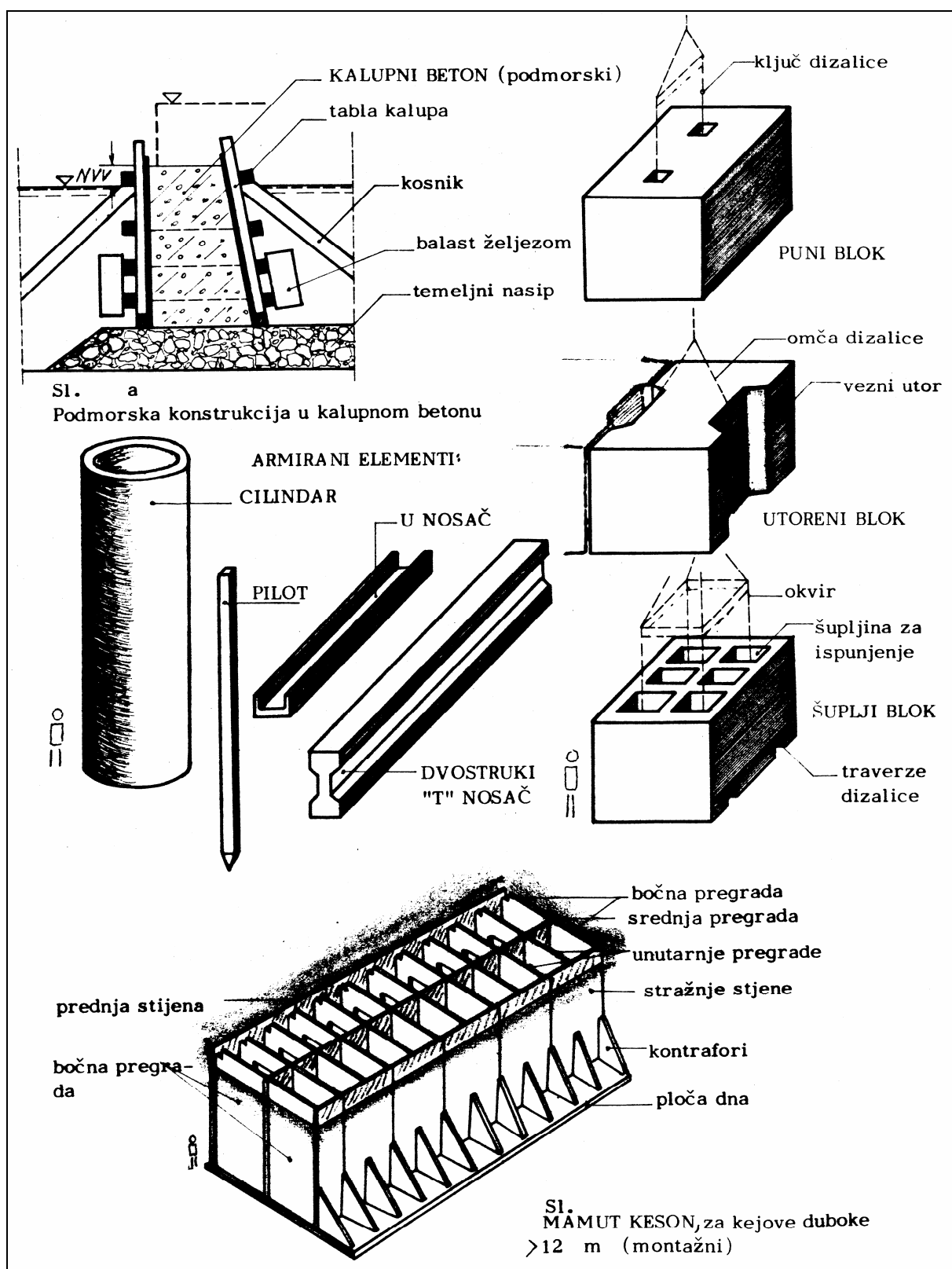
2.4.3-2 BETONSKI ELEMENTI

Najveći dio pomorskih građevina od betona gradi se pomoću betonskih elemenata. Oni se dobivaju prefabriciranjem na kopnu pa se tako izbjegava betoniranje u moru (Sl. 2.4.3::1). Osim toga ubrzava se građenje, a ako su armirani onda se reducira težina materijala kod transporta i ugradbe.

Nearmirani betonski elementi

- **Mali** elementi dolaze u primjenu tamo gdje je djelovanje mora slabo pa su takvi elementi slični onima u kopnenim vodogradnjama (osiguranja obale, popločenja pokosa i sl.).
- **Blokovi** su masivni puni ili šuplji elementi (Sl. 2.4.3::1) od 10 do 300 t. Gornja granica ovisi o dizalici za montažu koja je na raspolaganju. Oko 90% podmorskih zidova gradi se od njih!

Armirani betonski elementi su vrlo pogodni kod pomorskih gradnji jer se izbjegava betoniranje u moru. Mogu biti: razni nosači, ploče, stupovi, piloti i drugo (Sl. 2.4.3::1).



Sl. Sl. 2.4.3::1 Betonske podmorske konstrukcije

Prednapeti betonski elementi se koriste kao prefabrikati kod jako napregnutih elemenata, na pr. kod nosača većih raspona, koji se kao tipski element na nekoj pomorskoj gradnji primjenjuju u velikom broju i čija se prefabrikacija tada isplati.

Složeni armiranobetonski masivi su mamut dimenzija. AB plutajući kesoni se izrađuju na navozima kao u brodogradnji. Na licu mjesta mogu se graditi samo u suhoj građevnoj jami kao klasično građeni ili montažni.

2.4.4 METALNE KONSTRUKCIJE

su u novije vrijeme, tehnološkim napretkom (siderurgija, transport, ugradba) postali sve više uprebne u pomorskim gradnjama. Naročito se koriste čelične cijevi kao piloti i cjevovodi, zatim platforme pristana i vanobalnih konstrukcija koje se izrađuju u brodogradilištima i plivajući dovode na mjesto ugradnje. Ipak najčešća je upotreba čeličnog žmurja! Posebno mjesto zauzimaju i duraluminijske konstrukcije za pontone u marinama.

2.4.5 OSTALE KONSTRUKCIJE

2.4.5-1 BITUMENSKE KONSTRUKCIJE

Bitumenske konstrukcije (Sl. 2.4.5-1::1) se dijele na:

- Kamenomet sa bitumenom, gdje se šupljine podmorskog kamenog nasipa ispunjavaju (injektiraju) vrućim bitumenom i time stabilizira nasip;
- Pijesak sa bitumenom, služi kod obloga pokosa radi zaštite sitnog materijala jezgre.

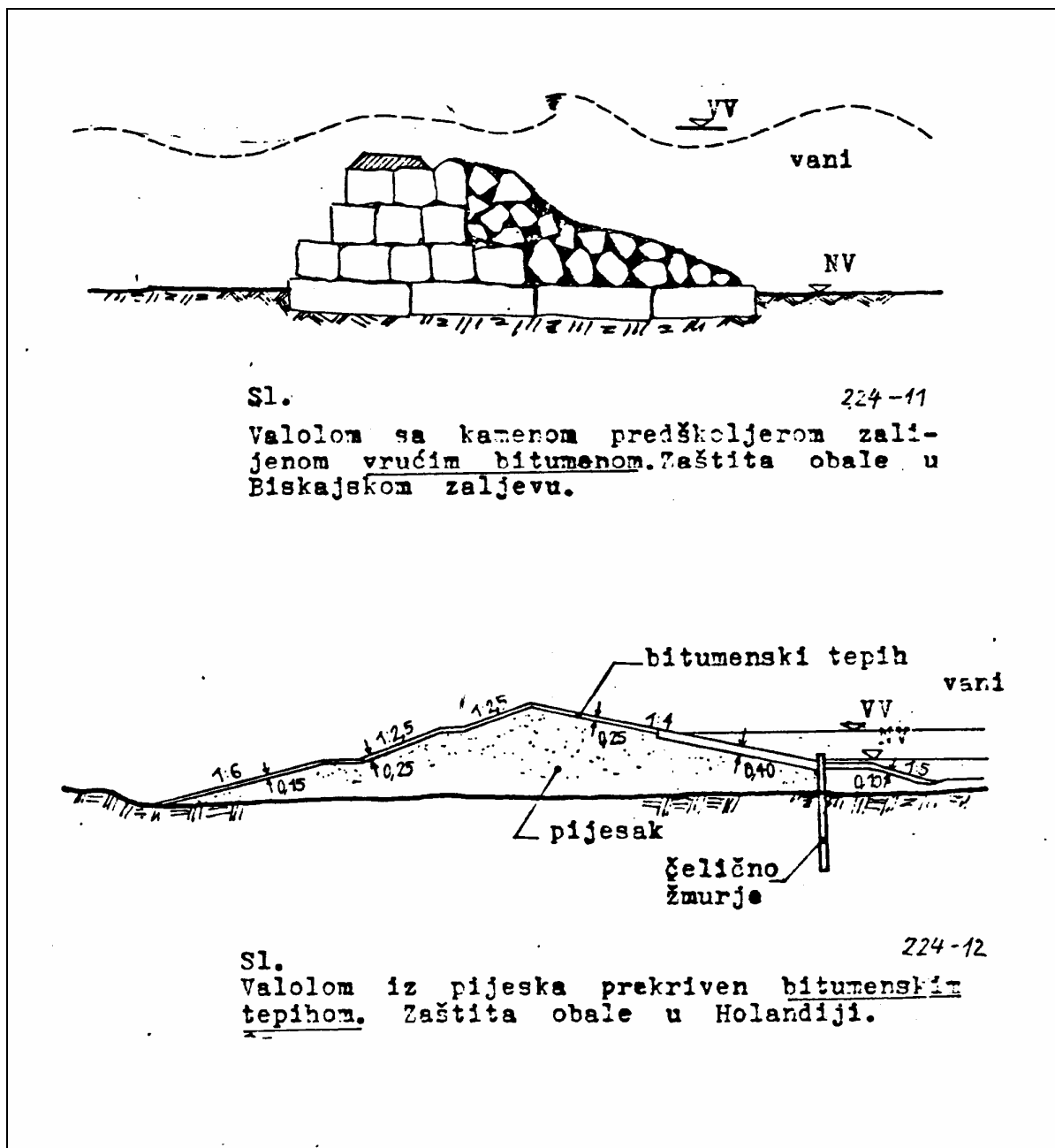
2.4.5-2 PLASTIČNI MATERIJALI

Koriste se masovno u uvidu protuerozijskih poroznih folija (PELD-mekana plastika) ili cijevi i fazonskih komada (PEHD-tvrda plastika), te kao geotekstil i geomreže.

2.4.5-3 GABIONI

Su geotehnički elementi u vidu košara od žičanog pletiva ispunjenih krupnim agregatom koje formiraju deformabilne zidove ili madrace. Slaganjem u vertikali (zidovi) ili horizontali (madraci) mogu se postići konstrukcije koje za izvjesno vrijeme odolijevaju valovima manje visine. Primjenjuju se u potpuno zaštićenom akvatoriju i moraju biti izrađeni od plastificirane pocinčane žica. Ne mogu se primjenjivati za trajne konstrukcije u područjima

djelovanja većih valova radi oštećivanja žice od pomicanja kamene ispune pobuđene na titranje morskim valovima.



Sl. 2.4.5-1::1 Bitumenske pomorske konstrukcije

2.5 TEHNOLOGIJA GRADNJE NASIPNOG LUKOBRANA

U principu postoje 2 načina gradnje nasipnih lukobrana:

- s mora pretežno plovnom mehanizacijom i
- s krune pretežno kopnom mehanizacijom.

Kod gradnje kamenog nasipnog lukobrana proces počinje u kamenolomu. Nakon miniranja jedne partije izvrši se selekcija A, B, C i D krupnih blokova (vidi 8.1-1.2), nepravilnih kakvi se dobiju nakon miniranja, a ostatak izminirane kamene mase je za jezgru (mješovite granulacije raspona otprilike 0,1 do 500 kg).

Ako se predviđa gradnja s mora (Sl. 2.5::1), kameni materijali se kopnenim transportnim sredstvima transportiraju do obale gdje se na gradilišnom pristanu utovaruju na transportna plovila (maone, platforme, prevrtaljke ili klapete), koje tegljači otegle na mjesto ugradnje. Ugradnja jezgre obavlja se sipanjem s plovila tako da se naspe more od dna do kote cca -2,5 m koliko je ograničenje gazom. Smjer nasipavanja je od korijena lukobrana prema glavi. Ostali podmorski dio i nadmorski dio jezgre ugrađuje se kopnenom mehanizacijom (damperima) s krune jezgre sipanjem s čela. Obloge se na mjesto ugradnje transportiraju isto kao jezgra, a ugrađuju plovnom dizalicom, tako da se prati ugradnja jezgre na 30 do 50 m zaostatka. Jezgra bez obloge ne može dugo stajati zbog mogućnosti oštećenja od valova. Kruna obloge (iznad kote cca +1 do +1,5 m) se se ugrađuje zadnja, od glave prema korijenu lukobrana, radi omogućavanja prolaza kopnene mehanizacije po kruni.

Ako se predviđa gradnja s krune (Sl. 2.5::2) kameni materijali se kopnenim transportnim sredstvima transportiraju do mjesta ugradnje vožnjom po kruni jezgre koja stoga mora biti nad morem. Ugradnja jezgre obavlja se sipanjem sa čela, a smjer nasipavanja je od korijena lukobrana prema glavi. Obloge se na mjesto ugradnje transportiraju damperima, isto kao jezgra, a ugrađuju dizalicom smještenom na kruni, tako da se prati ugradnja jezgre na 30 do 50 m zaostatka. Duboke obloge za koje dizalica na kruni nema dohvata ugrađuju se plovnom dizalicom. Kruna obloge se ugrađuje zadnja, od glave prema korijenu lukobrana.

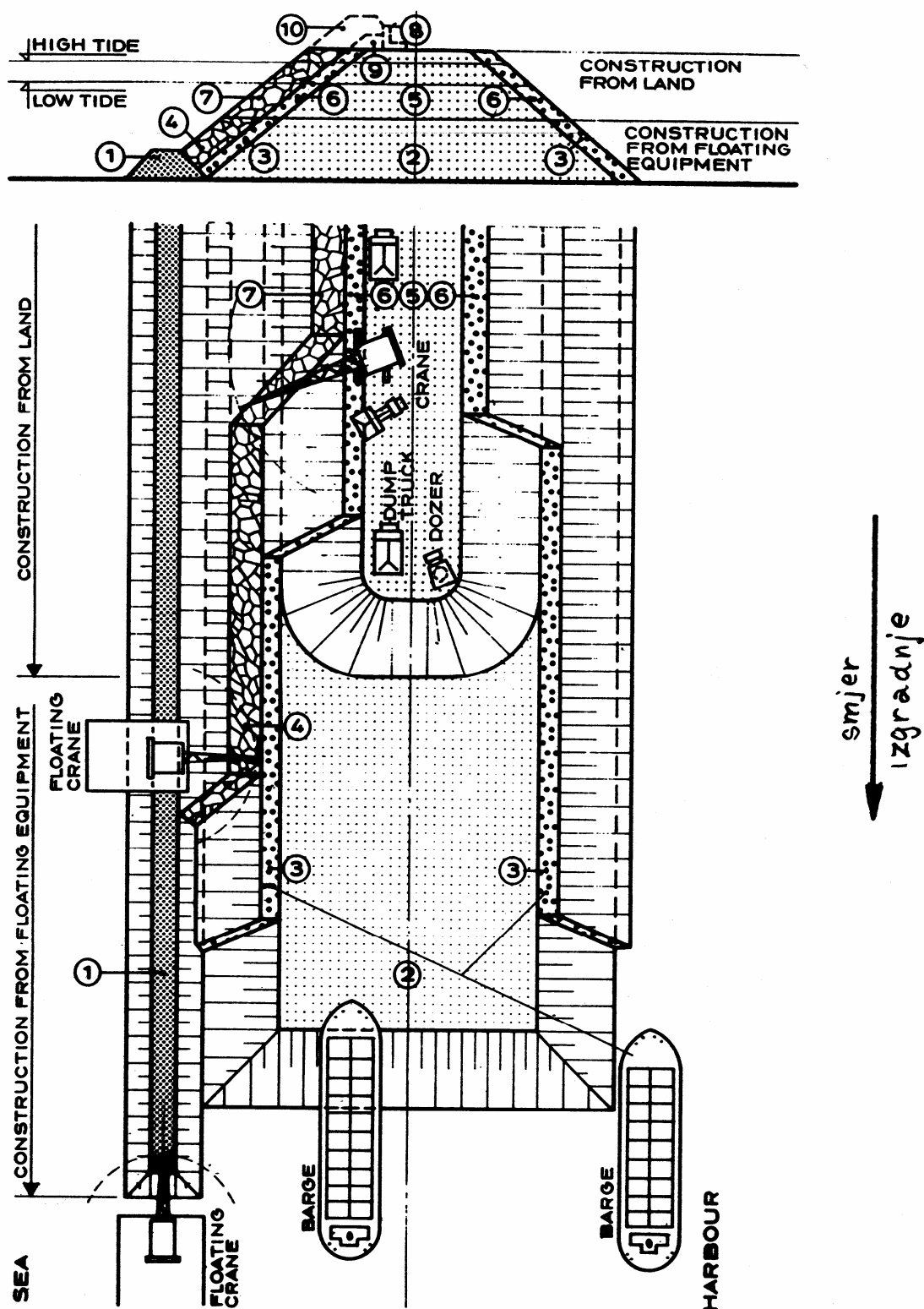
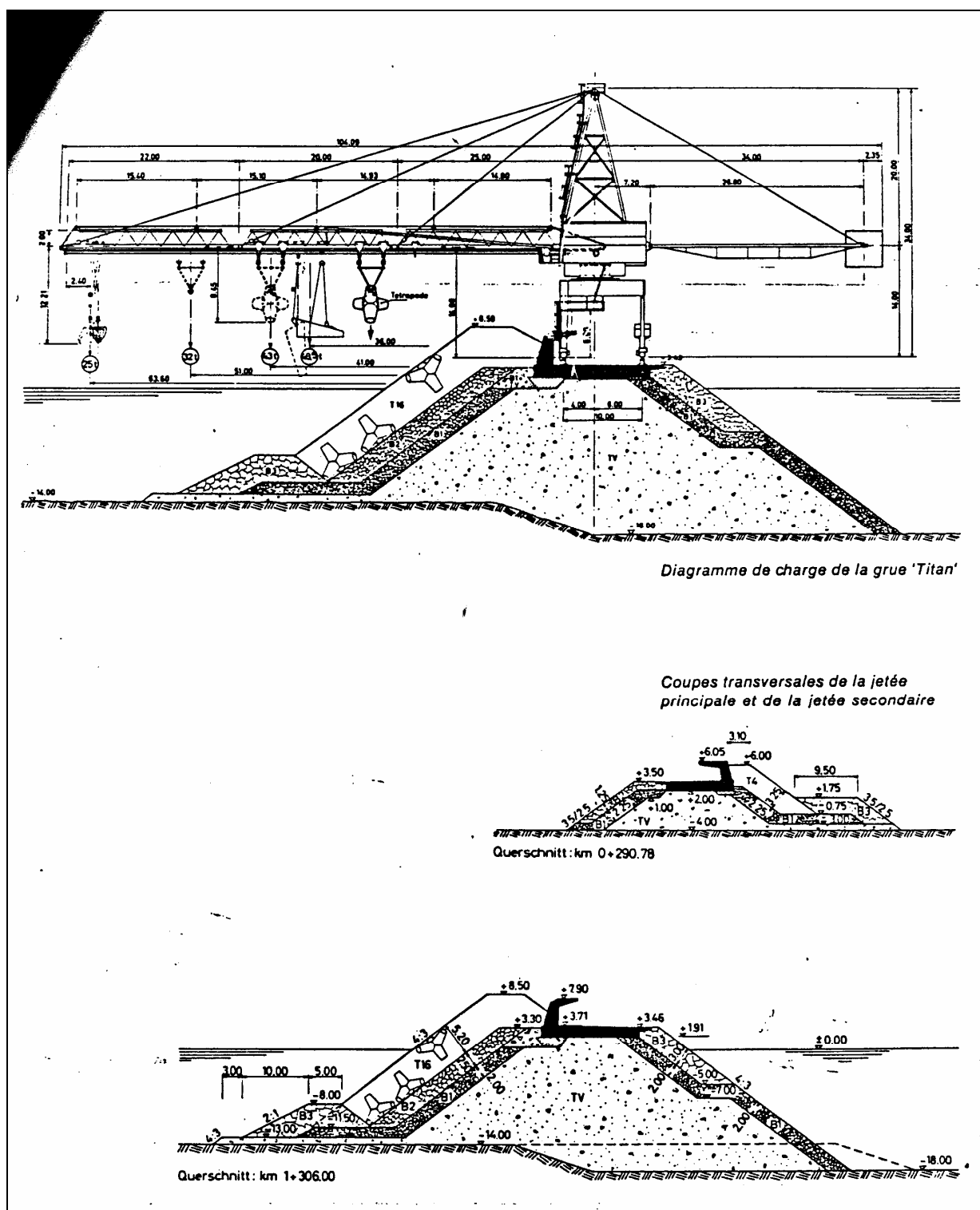


Fig. 64 (a) Construction of Rubble-Mound Breakwater.
Reproduced by permission of H. Vandervelden

Sl. 2.5.:1 Tehnologija gradnje nasipnog lukobrana s mora s pretežno plovnom meh.



Sl. 2.5::2 Postava kamenometnih obloga dizalicom s krune lukobrana

2.6 TEHNOLOGIJA GRADNJE VERTIKALNOG LUKOBRANA

Materijal za gradnju je isključivo beton i armirani beton.

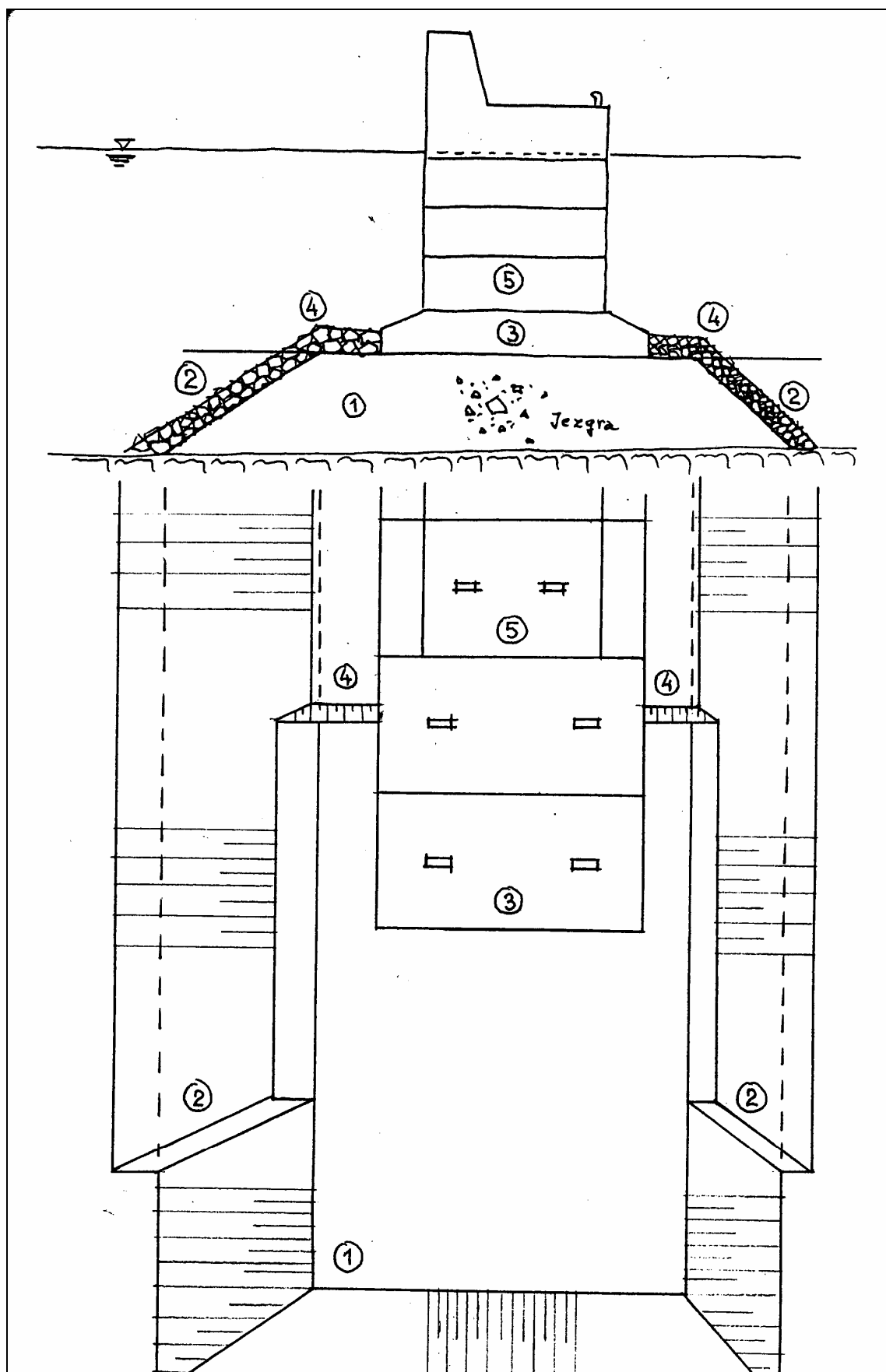
Najprije treba naglasiti da nije moguće izgraditi masivni betonski vertikalni lukobran betoniranjem na licu mjesta, i to iz više razloga: teška izvedba mamut oplata pod morem rušenje oplata valovima, problem transporta i ugradbe ogromnih količina betona i sl.

Obzirom na varijante presjeka lukobrana tipa zid razlikuju se tri tehnologije gradnje:

- plovnom dizalicom
- s krune
- upotrebom plivajućih mamut kesona.

Prikazat će se primjer tipične tehnologije s plovnom dizalicom (Sl. 2.6::1). Proces počinje proizvodnjom betonskih blokova (mase do 300 t) na obali uz koju može pristati plovna dizalica. Paralelno s time priprema se temeljni kameni nasip kojim se eliminiraju nagib i neravnine dna. Kruna tog podmorskog nasipa se iznivelira sitnim kamenim materijalom; t.j. uredi se u vidu podmorske tucaničke posteljice, čime je pripremljena za postavu blokova. Kad betonski blokovi prime punu čvrstoću, plovna dizalica ih natovari na svoj trup i transportira na mjesto ugradnje gdje ih spušta na dno. Taj se postupak vrši uz pomoć specijalnih geodetskih metoda za iskolčenje objekata uz vizualnu kontrolu ronilaca. Blokovi se slažu u vidu priljubljenih "stupova", a ne kao vez opeke. Zadnji blok malo viri iz mora (iznad SVVŽR). Nakon završetka jednog dijela lukobrana dizalica i dalje doprema blokove, ali ih ne polaže na dno nego dodaje još 2-3 reda blokova na završeni dio. Tim preopterećenjem završenog dijela se ubrzava proces slijeganja.

Blokovi se za slučaj temeljenja na nekoherentnom dnu ili stijeni mogu ubrzo i skinuti (dobro je da prođe par oluja ili cijela zima) jer se slijeganje temeljnog nasipa i tla obavi odmah po opterećenju. Kod koherentnog dna postoji vremenski tok slijeganja i opterećenje se može skinuti tek kada se po geomehničkom proračunu realizira pretežni dio slijeganja. Nakon skidanja opterećenja primijetiti će se diferencijalna slijeganja među kolonama lukobranskog zida. One se anuliraju betonom nadmorskog dijela lukobrana koji se betonira u oplati na licu mjesta.



Sl. 2.6::1 Tehnologija gradnje vertikalnog lukobrana