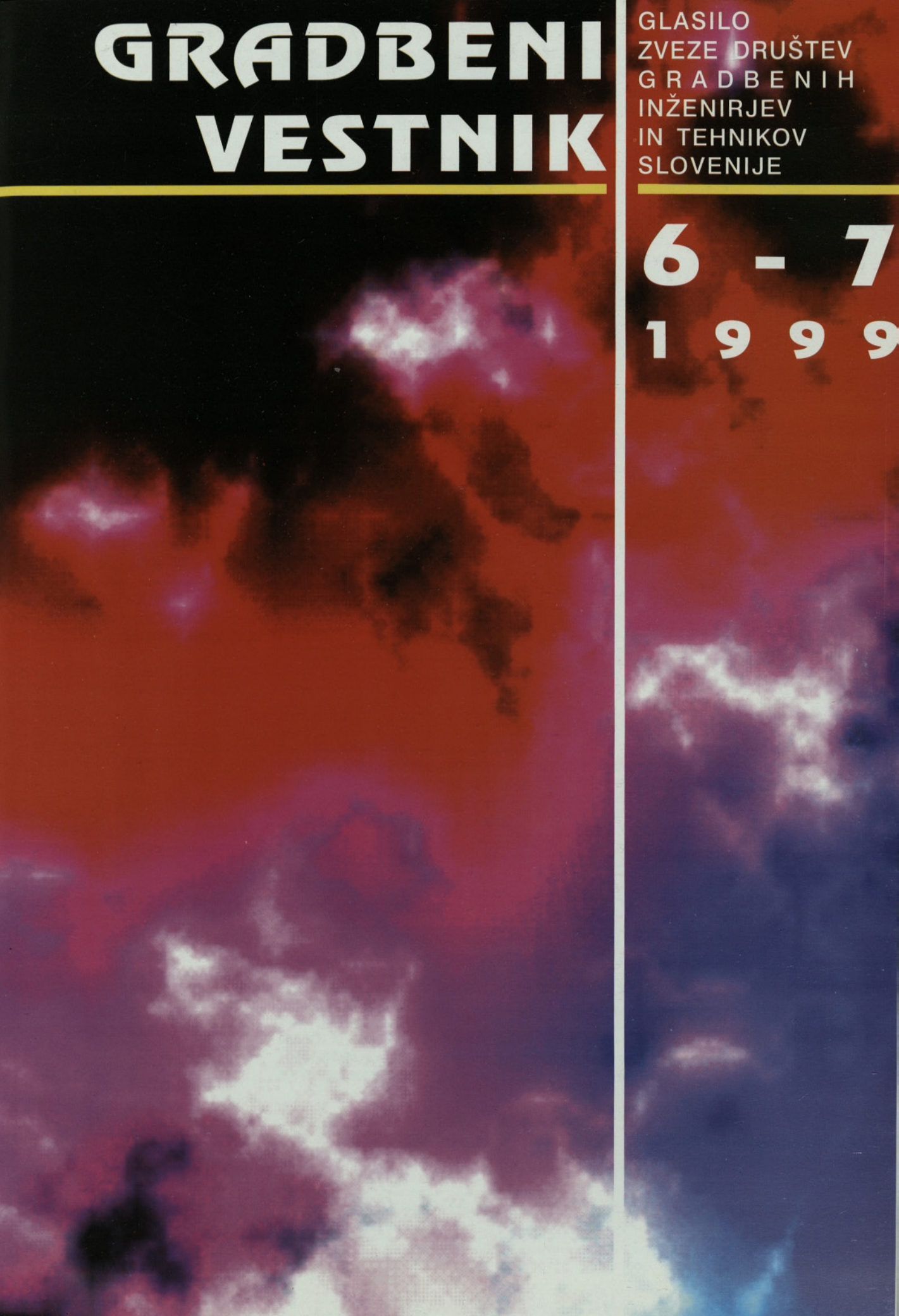


GRADBENI VESTNIK



GLASILO
ZVEZE DRUŠTEV
GRADBENIH
INŽENIRJEV
IN TEHNIKOV
SLOVENIJE

6 - 7
1 9 9 9

VSEBINA - CONTENTS

Članki, študije, razprave Articles, studies, proceedings

Stran 136
SERGEJ BUBNOV

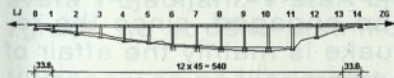
DILEME POPOTRESNE OBNOVE V POSOČJU

DILEMAS OF THE
POSTEARTHQUAKE
RECONSTRUCTION IN THE
SOČA VALLEY (AFTER THE
EARTHQUAKE OF 15TH APRIL
1998)

Stran 141
TATJANA ISAKOVIČ, MATEJ FISCHINGER

METODE POTRESNE ANALIZE VIADUKTOV V STANDARDU EUROCODE 8/2

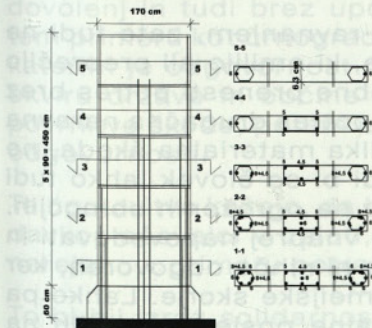
METHODS OF EUROCODE 8/2
BASED SEISMIC ANALYSIS OF
VIADUCTS



Stran 147
M. FISCHINGER, T. ISAKOVIČ, S. KRIŽAJ

NAPOVED POTRESNEGA ODZIVA ARMIRANOBETONSKE STENE

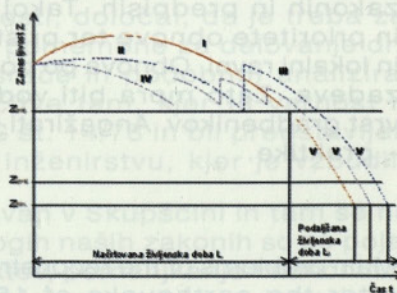
SEISMIC RESPONSE
PREDICTION OF A RC
STRUCTURAL WALL



Stran 153
J. ŽNIDARIČ, B. TREPPO-MEKIŠ, A. LEGAT

STRATEGIJE PRI NAČRTOVANJU SANACIJ BETONSKIH KONSTRUKCIJ POŠKODOVANIH ZARADI KOROZIJE ARMARURE

REPAIR STRATEGIES FOR
CONCRETE STRUCTURES
DAMAGED BY REINFORCEMENT
CORROSION



Stran 173
JANA ŠELIH

UPORABA IN TRAJNOST CEMENTNIH MATERIALOV V ODLAGALIŠČIH NIZKO IN SREDNJE RADIOAKTIVNIH ODPADKOV

THE USE DURABILITY OF
CEMENT MATERIALS IN LOW-
INTERMEDIATE RADIOACTIVE
WASTE DISPOSALS

Stran 181
NATAŠA ŽITKO ŠTEMBERGER

NOVE UREDBE IN HARMONIZACIJA Z EVROPSKIMI PREDPISI

Glavni in odgovorni urednik:

Franc ČAČOVIČ

Lektor:

Alenka RAIČ - BLAŽIČ

Tehnični urednik:

Danijel TUDJINA

Uredniški odbor:

Sergej BUBNOV
mag. Gojmir ČERNE
prof. dr. Miha TOMAŽEVIČ
dr. Ivan JECELJ
Andrej KOMEL
Stane PAVLIN
dr. Franci STEINMAN

Tisk:

Tiskarna TONE TOMŠIČ d.d.
v Ljubljani

Revija izdaja Zveza društev gradbenih
inženirjev in tehnikov Slovenije, Ljubljana,
Karlovska cesta 3, telefon/faks: 061/221-
587, ob finančni pomoči Ministrstva za
znanost in tehnologijo, Gradbenega
inštituta ZRMK, Zavoda za gradbeništvo
Slovenije, Fakultete za gradbeništvo in
geodezijo, Univerze v Ljubljani ter Fakultete
za gradbeništvo, Univerze v Mariboru.

Tiska Tiskarna Tone Tomšič d.d., Ljubljana.

Količina 1000 izv.

Letno izide 12 števk. Individualni naročniki
plačajo letno naročnino v višini 3.000
SIT, študentje in upokojenci 1.500 SIT.
Gospodarske organizacije in podjetja
plačajo letno naročnino za 1 izvod revije
35.000 SIT. Naročnina za naročnike v
tujini znaša 100 USD.
V ceni je všteti DDV.

Žiro račun se nahaja pri Agenciji RS
za plačilni promet, Enota Ljubljana, številka:
50101-678-47602.

DILEME POPOTRESNE OBNOVE V POSOČJU

DILEMMAS OF THE POSTEARTHQUAKE RE-CONSTRUCTION IN THE SOČA VALLEY (AFTER THE EARTHQUAKE OF 15TH APRIL 1998)

UDK: 699.841.059.25 : 351.82

SERGEJ BUBNOV

POVZETEK

Prikazana je slovenska zakonodaja na področju protipotresne gradnje. Po potresu 15. aprila 1998 v Posočju so se v praksi pojavili številni problemi, ki niso obravnavani v zakonih in predpisih. Takoj je treba določiti glavne cilje in prioritete obnove ter pristojnosti organov na republiški in lokalni ravni. Obnova po potresu je predvsem gradbeniška zadeva. Zato mora biti vodilni kader, ki vodi obnovo, iz vrst gradbenikov. Angažirati je treba najboljše strokovnjake - praktike.

SUMMARY

Main problems of the reconstruction of the damaged buildings after the earthquake of 15th april 1998 are presented. Existing Slovenian earthquakeresistant legislation is noted. The most important goals of relief should be determined in advance and their priority appointed. The best builders and constructors should be engaged, since the reconstruction after the earthquake is mainly the affair of earthquake engineers and builders.

Avtor:

Prof. Sergej BUBNOV, univ. dipl. inž.

Po močnem potresu 15. aprila 1998. leta, ki je prizadel Posočje in poškodoval, deloma tudi porušil številne stavbe, so se pred širšo javnostjo pojavili številni problemi, za katere rešitve niso podane v zakonih in predpisih. Pristojnosti in naloge posameznih organov oblasti na republiški, regionalni in lokalni ravni, ter njihov odnos do občanov, neposredno prizadetih s potresom, niso povsem jasne.

Potres je naraven pojav, ki ga ne povzroči človek s svojim ravnanjem, zato tudi ne more vplivati na njegov nastanek. Lahko pa sprejme ukrepe, ki omilijo ali preprečijo škodljive posledice. Tak ukrep je gradnja stavb, ki so sposobne prenesti potres brez usodnih poškodb, ki bi ogrožale življenje ljudi. Glede tega je potres drugačna naravna nesreča kot, recimo, katastrofalne poplave, kjer nastaja velika materialna škoda, ne ogroža pa (praviloma) človeških življenj. Tej materialni škodi bi se človek lahko tudi izognil, če bi se pravočasno lotil regulacije rek in vodotokov na ogroženih območjih. Potres je najbolj neusmiljen naravni pojav, ki ga ni mogoče vnaprej napovedovati in katerega posledice so lahko najbolj katastrofalne. Za potres ni nihče odgovoren, ker ga poraja sama narava v še vedno tekočem oblikovanju zemeljske skorje. Lahko pa se postavlja vprašanje odgovornosti za materialne in moralne posledice, ki jih na

danem območju potres povzroči. To vprašanje je pomembno, ker mora tisti, ki je odgovoren za te posledice, nositi tudi stroške odprave teh posledic.

V primeru potresa obstaja več odgovornih dejavnikov za nastalo škodo: država, občina in posamezniki. Država bi morala z zakoni, predpisi in drugimi upravnimi akti zagotoviti izgradnjo takšnih zgradb, ki bi bile sposobne prevzeti potresne obremenitve na lokacijah, ki so namenjene za gradnjo. V tej smeri je v prejšnji državi največ naredila SR Slovenija. Izmed vseh republik SFRJ je prva 1962. leta izdelala predpise za gradnjo v seizmičnih območjih, ki jih je po potresu v Skopju 1963. leta prevzela cela država (Sl. list SFRJ št. 39/64). S temi predpisi naj bi bila zagotovljena potresna varnost novih zgradb, ki jih bodo šele gradili (pod pogojem, da jih bodo izvajalci, projektanti in graditelji tudi upoštevali). S temi predpisi pa ni bila zagotovljena potresna varnost obstoječih zgradb, zgrajenih v preteklih obdobjih.

V Sloveniji je bil tudi v tej smeri narejen prvi korak k rešitvi tega problema. Skupščina SR Slovenije je sprejela 1978 leta zakon o seizmološki službi. S tem zakonom je kot prva v državi uredila status seizmološke službe v republiki, ki je postala upravni organ s financiranjem iz republiškega proračuna. Pozneje se je ta organ preimenoval v Republiško upravo za geofiziko. Istočasno je ta zakon, ki je po svoji vsebini tudi zakon o protipotresni dejavnosti, določal, da je treba za pomembnejše zgradbe (kjer se zbira veliko ljudi, zgradbe, pomembne za delovanje države, zgradbe, katerih rušenje bi lahko povzročilo nove nesreče in podobno) analizirati potresno varnost in izvršiti potrebne konstrukcijske ojačitve tam, kjer ta varnost ni bila zadostna. Zakon je bil objavljen v uradnem listu SRS št. 14/78 in bil predstavljen svetu na različnih strokovnih kongresih o protipotresnem inženirstvu, kjer je vzbudil zanimanje in obravnavanje.

Žal ta zakon, čeprav obravnavan v Skupščini in tam še nekoliko dopolnjen in poostren, ni zaživel v praksi. Kot pri mnogih naših zakonih so se pojavile številne težave, predvsem pomanjkanje podzakonskih aktov, pomanjkanje finančnih sredstev, pomanjkanje interesa lastnikov oziroma upravljalcev teh zgradb in podobno. Tako je potresna varnost zgradb, ki so bile zgrajene pred uveljavo gradbeno-tehničnih predpisov za protipotresno gradnjo, še vedno vprašljiva. Na podlagi tega zakona je bila potresno sanirana le palača Izvršnega sveta v Ljubljani. V stari Ljubljani je bilo potresno sanirano nekaj starih stanovanjskih zgradb na stroške lastnikov ali iz občinskega proračuna.

V Posočju so poškodovane in deloma porušene v glavnem stare stavbe, katerih lastniki so jih povečini podedovali, grajene pa so bile tudi pred več kot sto leti. Odgovornosti za pomanjkljivo potresno varnost teh zgradb nikakor ne moremo naložiti sedanjim lastnikom, ker noben zakon ni od njih zahteval, naj te stavbe potresno sanirajo. Pa tudi postopek sanacije teh stavb je dokaj zapleten in drag ter zahteva sodelovanje prav izkušenih strokovnjakov.

Odgovornost za posledice potresa je torej vsestranska. Država je odgovorna, ker ni izdelala kart seizmične rajonizacije svojega ozemlja, ker ni izdala zakonov in predpisov za protipotresno gradnjo in sanacijo potresno neodpornih zgradb, oziroma če takšni akti obstajajo, ni zagotovila izvajanja teh aktov v praksi.

Občine so odgovorne, ker so gradili svoje stavbe brez ustreznih lokacijskih in gradbenih dovolenj in tudi brez upoštevanja protipotresnih predpisov. Sicer so posamezniki v tem primeru kot črnograditelji odgovorni tudi po drugih zakonih. Razen posameznikov, katerim je odgovornost možno dokazati, je identificiranje, konkretne odgovornosti v okviru države in občine praktično nemogoče. Če odgovornost povežemo z obvezo povrnitve škode, potem je ta obveza neugotovljiva, kot je neugotovljiva tudi razmejitev odgovornosti.

Te ugotovitve kažejo, da bi morala stroške obnove po potresih prevzeti država oziroma davkoplačevalci v celoti, s pomočjo ustreznega davka oziroma sklada, kot je to bilo narejeno v primeru potresa v Skopju oziroma sedaj s "posočnino" za obnovo Posočja. To bi bil izraz solidarnosti vsega naroda do tistih, ki jih prizadene naravna nesreča,

za katero niso nič krivi. Če bi sprejeli takšen načelni sklep, po tem bi bil ves podtopen financiranja obnove in sanacije stavb neodvisen od premoženjskega stanja lastnika. Ne bi bilo treba opravljati zamudnih finančnih operacij v zvezi z najemanjem kreditov in zlasti načinov njihovega odplačevanja. Vsa sredstva bi bila nepovratna. Odpadlo bi ugotavljanje stroškov sanacije za vsak objekt posebej, glede na status lastnika in še številni drugi administrativno tehnični postopki.

Da bi se bila popotresna obnova uspešno začela, je treba najprej določiti pristojnosti vseh udeležencev obnove. Če bi se zmenili, da vse stroške sanacije prevzame država (davkoplačevalci), potem bi bilo logično, da je država z ustreznimi organi tisti glavni dejavnik, ki vodi popotresno obnovo. Državo v tem primeru predstavlja vlada s svojimi ministrstvi.

Popotresna obnova je predvsem gradbeniška zadeva. Tukaj ne gre za arhitektonsko oblikovanje novih stavb (razen v nekaterih izjemnih primerih), temveč za izboljšanje nosilnih konstruktivnih elementov zgradb. Tukaj imajo glavno besedo gradbeniki - statiki in gradbeniki - operativci. Skratka, gradbeniška stroka.

Ko so po osvoboditvi iskali nove oblike organizacije oblasti (vlade), je bilo eno izmed spornih vprašanj kam (v katero ministrstvo) sodi gradbeništvo. V prejšnjem režimu je bilo gradbeništvo vključeno v ministrstvo (sekretariat) za gospodarstvo, ki je imel pomočnika (sekretarja), zadolženega za gradbeništvo. Po novem so gradbeništvo povsem sholastično vključili v ministrstvo za okolje in prostor (MOP), češ, zgradbe so tudi del urejenega prostora. Zaradi takšnega pristopa je gradbeništvo prišlo v roke sociologov, arhitektov, pravnikov, urbanistov, varuhov vodotokov, skrbnikov za odpadke, atomskih fizikov in še marsikaterega strokovnjaka, ki z gradbeništvom ni imel nobene zveze. Šele po določenem času so oblikovali delovno mesto referenta za gradbeništvo, ki pa ne sodi v vrsto vodilnih delavcev MOP-a, kot so to minister in državni sekretarji. Tako je gradbeništvo pristalo v dokaj neprimerni (tuji) družbi. V večini evropskih držav ima gradbeništvo svoje ministrstvo (Bauministerium).

Ko se je vlada po potresu v Posočju odločila, da prevzame odpravo posledic potresa v svoje roke, je to pomenilo, da je to nalogo prevzelo MOP. To je bila, glede na prej omenjeno strukturo vodilnega kadra tega ministrstva, napaka.

Uspeh sleherne dejavnosti je vedno v prvi vrsti odvisen od kakovosti vodilnega kadra. Vodilni kader mora poznati svojo stroko do najmanjših detajlov. To poznavanje se lahko pridobi le v praksi. Šole dajejo le teoretično znanje, ki ga lahko uporabimo v posameznih fazah delovnega procesa, za vodenje celotnega procesa pa je potrebno globalno poznavanje stroke in problema.

Tudi izkušeni gradbenik, ki se po potresu sooči z nastalim razdejanjem, se bo prvi trenutek znašel v dvomih, ali bo to razdejanje lahko uspešno saniral. Uspešno pomeni gradbeno - tehnično kakovostno, ekonomsko racionalno in hitro. Čas je pri tem izredno pomemben dejavnik, zlasti v primeru, če je čas gradbene sezone omejen, glede na morebitno bližajočo se zimo.

Pri tem mora gradbenik poznati tehnologije saniranja poškodovanih stavb, razpoložljive kapacitete gradbene operative, dosegljivost potrebnih gradbenih materialov in profesionalnih delavcev ter seveda višino razpoložljivih materialnih sredstev. Pri odločanju o programu obnove mora odgovorni vodja obnove ovrednotiti vse omenjene elemente problema istočasno. Le tako bodo odločitve optimalne in poslovne.

Po potresu v Posočju leta 1976 je vodenje obnove prevzel tudi sekretariat za urbanizem v tesni povezavi s sekretariatom za gospodarstvo in gospodarsko zbornico Slovenije. Kadrovska zasedba vodstva takratnega sekretariata pa je bila bistveno drugačna. Sekretar je bil izkušen in sposoben gradbeni inženir, ki je že vodil pomembna gradbena dela doma in v tujini. Imel je tri pomočnike: pravnika in dva izkušena gradbena inženirja. Konkretna naloge so izvajale strokovne institucije, ki so tudi sedaj angažirane pri obnovi Posočja: Zavod za raziskavo materiala, Fakulteta za arhitekturo gradbeništvo

in geodezijo in druge specializirane gradbene organizacije. Kakovost sanacije ni mogla biti slabša, kot je sedanja, kakor izjavljajo nekateri sedanji nosilci sanacije. Uporabljali so iste metode in tehnologijo sanacij, kot jo uporabljajo sedaj. Kritiko prejšnje sanacije (iz leta 1976) je treba jemati z rezervo in predvsem kot željo, da se opraviči sedanja počasna in neučinkovita sanacija. Presoja uspešnosti sanacije je sicer odvisna od ciljev in prioritet, ki so bili za sanacijo vnaprej postavljeni.

Končni cilj sanacije je zagotoviti prizadetemu prebivalstvu čim hitreje normalne pogoje bivanja: varnost konstrukcije in stanovanje, ki ima vodo, elektriko in gretje. Ta cilj pa je treba postaviti v prostor in čas. Čas je zelo pomemben dejavnik, ker končni cilj pri neomejenem časovnem obdobju ni težko doseči. Pomembno je, da se ta cilj realizira čim hitreje, vsekakor pa pred nastopom zime, če se je potres zgodil spomladi. Potres 1976 je dal izvajalcem sanacije manj časa za izvršitev te naloge (zgodil se je v maju in septembru) kot sedanji potres (zgodil se je v aprilu).

Določevanje osnovnih elementov sanacijskega programa mora biti predvsem v pristojnosti samih prizadetih prebivalcev, torej na lokalni ravni, v občini. Prizadete občine morajo same določiti, ali naj njihovi občani preživijo zimo v slabo opremljenih zabojskih (kot se je zgodilo sedaj) ali pa naj se jim hitro zgradijo nova stanovanja (kot je bilo narejeno 1976. leta).

Demokratično izražena volja prizadetih domačinov mora biti odločilna za določitev načrta sanacij in prioritet izvedbe. Sedaj se dogaja, da se v proces sanacije vključujejo nekakšni drugi interesi, kot npr. rešitev cestnoprometnih problemov, ohranitev krajinske arhitekture, spomeniško varstvo in podobno. Vse to zavira dosego osnovnega cilja: hitre zagotovitve ustreznih bivalnih pogojev prizadetim prebivalcem. Pojavljajo se urbanisti, arhitekti in drugi posamezniki, ki s pomočjo časopisnih člankov in drugih medijev vnašajo zmedo v izvajanje obnove Posočja. Njihov pretežni namen je verjetno lastna promocija.

Za počasnost obnove niso krivi samo ti dejavniki. Krivo je predvsem neustrezno in nestrokovno vodstvo celotnega projekta. Nekvalificirana institucija (MOP) dejansko vodi velik gradbeni poseg, četudi kadrovsko ni za to nalogo ustrezno usposobljena. MOP si je gradbeništvo prilastilo na podlagi (neustreznega) oblikovanja vlade (ministrstev) v času njenega nastajanja. Na vodilnih mestih v MOP-u ni nobenega gradbenika. Zato je razumljivo, da je za izgradnjo glavnega cestnega križa v Sloveniji vlada mimo MOP-a ustanovila posebno gradbeno organizacijo DARS, ki jo sestavljajo in vodijo gradbeniki. V Posočju je vlada organizirala Državno tehnično pisarno (projektni center), ki izdeluje načrte za sanacije posameznih zgradb. Ta ukrep je pravilen, ne rešuje pa problema v celoti. Načrte je treba realizirati v praksi s pomočjo gradbenih podjetij, ki morajo dela prevzeti po vnaprej določeni ceni. Vsa sanacijska dela - od najbolj enostavnih do popolnega rušenja zgradb, so bila popisana. Izvajanje teh del je bilo blokirano, doler ni bilo urejeno financiranje vse do najmanjših del v skladu s premoženjskim stanjem prizadetih. S tem so odvzeli samoiniciativo prizadetim posameznikom, ki so bili pripravljeni manjše poškodbe odstraniti sami. Sicer so od tega totalitarnega pristopa, ki je marsikje zavrl proces hitre sanacije, kasneje odstopili in dovolili posameznikom samoiniciativo odpravljanja manjših poškodb, kar so kasneje ustrezno plačali.

Ta pretirana birokratizacija postopka pri odpravi posledic potresa je znatno zavrla hitrost sanacije. Nepoznavanje problemov popotresne obnove (da ne rečem nestrokovnost) vodilnih kadrov institucije, ki je prevzela vodenje obnove, pretirano birokratiziranje in administriranje gradbeno-tehničnih postopkov so glavni vzroki, da je prva gradbena sezona po potresu prešla brez vidnih rezultatov obnove. Od 1.630 (po nekaterih podatkih 3.000) zgradb, potrebnih protipotresne sanacije, je bilo v tej sezoni obnovljenih za varno bivanje le nekaj več kot 15% stavb. To je zelo slab rezultat, zlasti če ga primerjamo z obnovo po potresu 1976. leta, ko so vsi prizadeti prebivalci imeli do zime že varno streho nad glavo.

Če analiziramo vzroke tako slabih rezultatov obnove po potresu leta 1998, potem

SERGEJ BUBNOV: Dileme popotresne obnove v Posočju

lahko ugotovimo, da je bil celotni pristop k odpravi posledic potresa v Posočju neustrezen. Odprava posledic potresa v prizadetem naselju je predvsem gradbeniška naloga, ki jo je treba natančno načrtovati. Najprej je treba izdelati projekt obnove, v katerem je treba določiti: cilje, pristojnosti, prioritete, način financiranja, sanacijske tehnologije in še druge parametre obnove. Pri tem je treba angažirati čim širši krog strokovnjakov, zlasti tiste, ki imajo velike izkušnje z odpravljanjem posledic potresov.

Za ta namen bi bilo treba ustanoviti posebno organizacijo, k bi imela široka pooblastila (vsaj takšna kot jih ima DARS). Najpomembnejše pri tem je najti ustrezni vodstveni kader te organizacije. Pri tem ni toliko pomembna višina strokovne izobrazbe kot managerski talent. V Sloveniji imamo v gradbeništvu dovolj sposobnih managerjev, ki so v preteklih letih naše investicijske izgradnje dokazali svoje sposobnosti. Dobro poznavanje gradbeništva je vsekakor glavni pogoj za vodjo te obnove.

Sam načrt obnove naj bi določili predvsem sami prizadeti občani. Tudi ni treba vsiljevati sanacije posameznih stavb njihovim lastnikom, če le-ti za to niso zainteresirani. V Breginju so hoteli obnoviti nekaj močno poškodovanih stavb zaradi ohranitve nekaj primerov tamkajšnje arhitekture. Čeprav je bila lastnikom ponujena popolna potresna varnost sanacije, so lastniki izjavili, da v teh stavbah ne bodo več živeli. S tem je sanacija izgubila svoj smisel in stavbe so bile prepuščene svoji usodi. Po potresu 1976 so se tudi zelo dobro izkazali župani prizadetih občin. Omogočali in pospeševali so uspešno delo strokovnih komisij, ki so ocenjevale škodo, pomagali so gradbenim podjetjem pri dobavi materiala in delovne sile. Dajali so občutek solidarnosti in pripravljenost medsebojnega sodelovanja. Vsak večer so sklicevali seje predstavnikov občinskih organov in članov strokovnih komisij, da bi pregledali rezultate dela tega dne in določili plan dela za naslednji dan.

Skratka, za uspešno delo popotresne obnove je poleg strokovne pomoči gradbenikov potrebno tudi medsebojno zaupanje prizadetih občanov in strokovnjakov. Tega zaupanja, kot je videti, pri obnovi Posočja ni dovolj.

Potres je nepredvidljiv pojav. Človeška narava je bolj nagnjena k misli, da ga ne bo, kot da bi ga pričakovala in se nanj pripravila. Seizmičnost našega ozemlja sicer ni tako velika, da bi sleherni prebivalec moral v svojem življenju doživeti rušilni potres. Kljub temu pa je le treba misliti na potres. Zbrane izkušnje od prejšnjih potresov bodo koristile boljši odpravi morebitnih potresov, ki še prihajajo.

Sergej Bubnov

METODE POTRESNE ANALIZE VIADUKTOV V STANDARDU EUROCODE 8/2

METHODS OF EUROCODE 8/2 BASED SEISMIC ANALYSIS OF VIADUCTS

UDK: 699.841 : 620.17 : 624.21 : 625.745.1 : 006 EUROCODE

TATJANA ISAKOVIČ, MATEJ FISCHINGER

POVZETEK

V članku podajamo kritično oceno uporabnosti različnih metod analize, ki jih predvideva standard Eurocode 8/2. Te metode smo analizirali na primeru tipičnega viadukta in s parametrično študijo večjega števila poenostavljenih konstrukcij. Najbolj pomembne ugotovitve te študije so: a) Elastična modalna analiza je v večini primerov dovolj uspešna. b) Poenostavljene statične metode lahko uporabljamo le pri zelo enostavnih konstrukcijah. Pri oceni enostavnosti si lahko pomagamo s predlaganim indeksom regularnosti. c) Pomike bolj pomembnih objektov je smiselno oceniti z nelinearno dinamično analizo.

SUMMARY

The critical estimation of various methods of the analysis, which are proposed by Eurocode 8/2, is presented in the paper. These methods were analysed on the example of the typical viaduct and within the parametric study of numerous simplified structures. The most important conclusions are: a) The elastic modal analysis is successful in most of the cases. b) The simplified static methods can be used for the analysis of simple structures, only. For estimation of the simplicity, the index proposed in the paper could be used. c) The non-linear dynamic analysis is recommended for estimation of displacements in the important structures.

Avtorja:*dr. Tatjana Isaković, dipl. gradb. inž., prof. dr. Matej Fischinger, dipl. gradb. inž.**Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Inštitut za konstrukcije potresno inženirstvo in računalništvo*

1. UVOD

Viadukti so na prvi pogled enostavne konstrukcije, katerih statični sistem določa predvsem funkcija objekta. Zaradi relativne enostavnosti statičnega sistema se jim ni v preteklosti posvečalo veliko pozornosti. Pri njihovi potresni analizi so bili upoštevani principi in linearne metode, ki se že leta uporabljajo pri projektiranju stavb. Tudi kriteriji, ki so

opredeljevali uporabnost posameznih poenostavljenih metod, so bili podobni tistim, ki veljajo za stavbe.

Šele po močnih potresih v Northridgeu (ZDA) in Kobeju (Japonska), kjer so ravno mostovi pretrpeli največje (katastrofalne) poškodbe, se potresnem projektiranju mostov posveča več pozornosti. Eno izmed svojih raziskav smo povzeli v tem članku. Dva poglobljena cilja te raziskave

sta bila:

1. Oceniti predlog novega evropskega standarda za projektiranje mostov na potresnih področjih - Eurocode 8/2 (EC8/2) [1],

2. Omogočiti čim hitrejšo uveljavitev tega standarda v praksi in s tem omogočiti projektiranje in izgradnjo mostov na novih avtocestah po najbolj sodobnih principih in metodah.

V okviru raziskave smo naredili

obsežne študije tipičnih, že zgrajenih mostov ter parametrične študije poenostavljenih tipičnih konstrukcijskih sistemov. Za posamezne konstrukcije smo analitične rezultate primerjali z eksperimentalnimi. Med ugotovitvami študije smo v tem članku izbrali in analizirali tiste, ki se nanašajo na izbiro metod potresne analize in sicer večinoma v prečni smeri konstrukcije.

Najprej smo obravnavali linearne metode analize (3. poglavje). Poleg splošnih napotkov za izbiro načina analize smo predlagali tudi indeks regularnosti, s pomočjo katerega lahko ocenimo primernost poenostavljene linearne statične metode analize. V 4. poglavju smo rezultate linearnih metod analize primerjali z rezultati nelinearne dinamične analize.

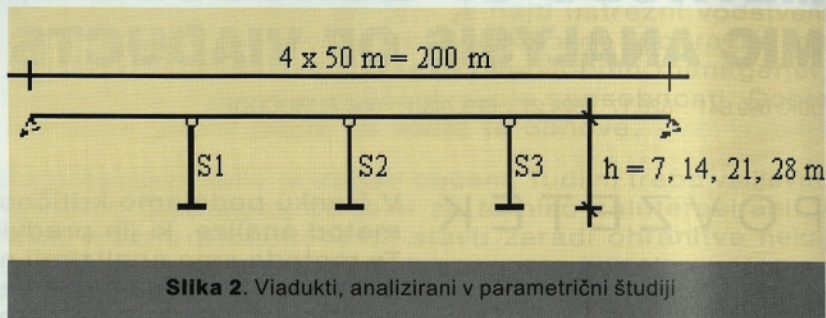
2. OPIS ANALIZIRANIH KONSTRUKCIJ IN POTRESNE OBTEŽBE

2.1. Konstrukcije

Rezultati študije so prikazani na dveh tipih konstrukcij. Prva konstrukcija je značilen viadukt razpona 607.6 m (slika 1). Preklada je kontinuirni škatlasti armiranobetonski nosilec, ki se naslanja na 13 stebrov. Nad opornikoma je v vzdolžni smeri podprta s pomičnimi ležišči, v prečni smeri pa je podprta z nepomičnimi podporami. Stebri so škatlasti. Na vrhu so členkasto povezani s preklado, na dnu pa vpeti v temelje. Potresna obtežba se v vzdolžni smeri viadukta prenaša le na tri stebre v oseh 7-9, v prečni smeri pa na vseh 13 stebrov.

Poleg tipičnega viadukta je bila narejena tudi parametrična študija poenostavljenih viaduktov preko štirih polj (slika 2). Na enakem konstrukcijskem sistemu so bile v raziskovalnem centru v Ispri [2] narejene tudi eksperimentalne preiskave.

projektним spektrom pospeškov, ki je določen v EC8/2. Pri tem smo predpostavili, da znaša pospešek temeljnih tal $a_g = 0.2g$ v primeru tipičnega viadukta in $a_g = 0.35g$ v parametrični študiji. V vseh primerih smo konstrukcijo projektirali kot duktilno, zato je faktor obnašanja



Slika 2. Viadukti, analizirani v parametrični študiji

V parametrični študiji smo obravnavali 80 različnih viaduktov, ki se med sabo razlikujejo po višini in razporedu stebrov vzdolž konstrukcije, ter po robnih pogojih nad opornikoma v prečni smeri konstrukcije. Vsakem izmed viaduktov smo določili ime, ki jasno opredeljuje njegove karakteristike. Tako je npr. V132-PP ime viadukta, v katerem je levi stranski steber visok 1 enoto, centralni steber je visok 3 enote in desni stranski steber je visok 2 enoti, pri čemer enota znaša 7m. Oznaka PP pomeni, da ima viadukt v svoji prečni smeri pomični podpori nad krajnima opornikoma, možna pa je tudi oznaka NP, ki označuje nepomični podpori nad opornikoma.

znašal $q = 3.5$.

V nelinearni analizi smo potresno obtežbo določili s tremi umetno generiranimi akcelorogrami in štirimi dejansko registriranimi akcelorogrami [3], ki so bili ustrezno normirani.

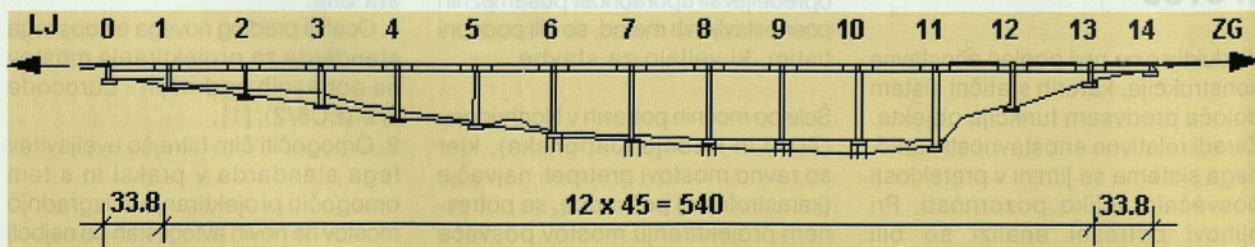
3. LINEARNE METODE ANALIZE

Standard Eurocode 8/2 predvideva številne zelo različne linearne metode analize:

1) Najbolj enostavna - poenostavljena statična metoda (SM) analize, kjer konstrukcijo modeliramo kot sistem z eno prostostno stopnjo. Slednja ima tri različice. V prvi predpostavimo, da je preklada toga, v drugi da je preklada podajna in v tretji, da vsak steber niha zase in ga zato računamo kot samostojen sistem.

2.2 Potresna obtežba

V linearnih metodah analize smo potresno obtežbo definirali s



Slika 1. Tipični viadukt

2) Modalna analiza s spektrom odziva (MA). To je metoda, v kateri konstrukcijo modeliramo kot sistem z več prostostnimi stopnjami in upoštevamo njene dinamične karakteristike.

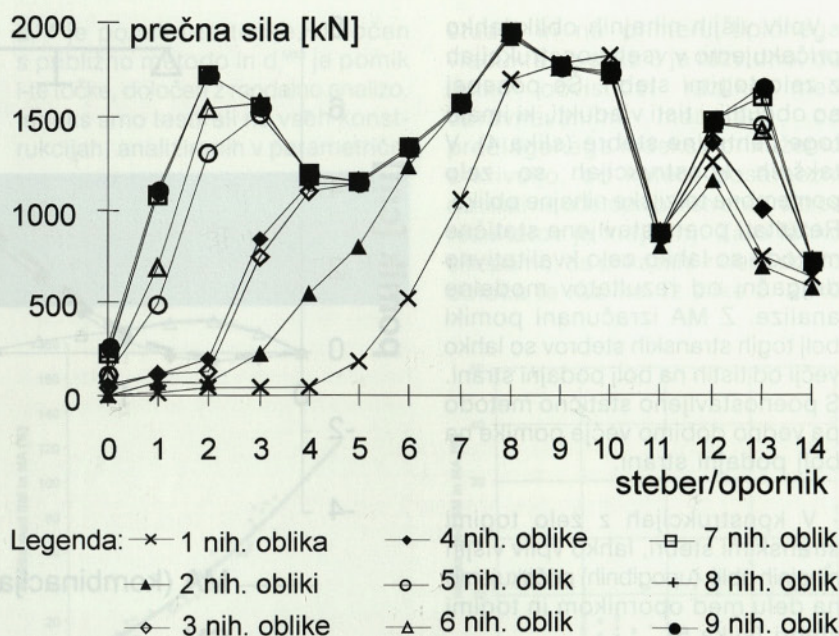
3) Linearna analiza časovnega odziva na potresno gibanje tal na modelu z več prostostnimi stopnjami.

4) Analiza s spektrom jakosti.

V študiji so obravnavane vse navedene metode analize, razen analize s spektrom jakosti. V vzdolžni smeri mostu zelo velikih razlik v odzivu, določenem z različnimi elastičnimi metodami, nismo opazili. Kljub temu smo za prečno smer ugotovili, da so lahko razlike v rezultatih posameznih metod analize pogosto zelo velike. Osnovni razlog za takšne razlike je večinoma vpliv višjih nihajnih oblik na nihanje mostu. Slednji je opisan v poglavju 3.1. Razlike v rezultatih posameznih metod so bile presenetljivo velike tudi v na prvi pogled pravih konstrukcijah, oz. tistih, ki jih Eurocode 8/2 opredeljuje kot regularne konstrukcije. Zato je v študiji definiran indeks regularnosti, na podlagi katerega bi lahko sklepali, kdaj so poenostavljene metode analize (SM s podajnim modelom preklade) primerne za analizo viaduktov.

3.1 Vpliv višjih nihajnih oblik

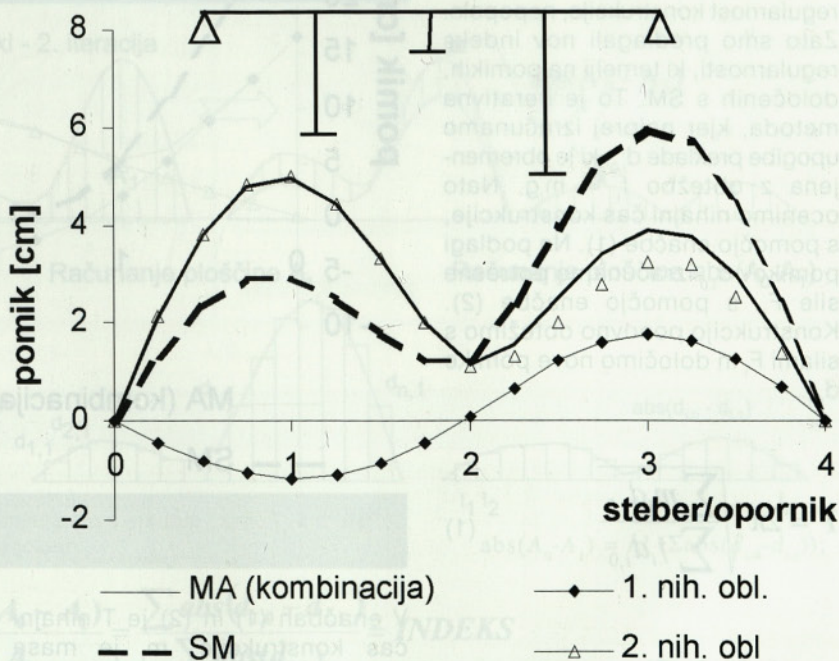
Tipičen viadukt bi lahko, po določilih EC8/2, analizirali s pomočjo SM, pri čemer bi predpostavili, da je preklada podajna. To pomeni, da bi viadukt analizirali na modelu z eno prostostno stopnjo in bi pri tem zanemarili vpliv višjih nihajnih oblik. Vendar bi storili hudo napako, saj na odziv tipičnega viadukta pomembno vpliva vsaj 7 nihajnih oblik (slika 3). Največji vpliv višjih nihajnih oblik opazimo na levem delu konstrukcije. Tako znaša npr. prečna sila v stebri 2 okoli 70 kN, če upoštevamo le 1. nihajno obliko, če pa upoštevamo 7 nihajnih oblik je vrednost prečne sile v stebri 2 okoli 1750 kN!



Slika 3. Vpliv višjih nihajnih oblik

Glede na relativno veliko število stebrov tipičnega viadukta, pomemben vpliv višjih nihajnih oblik niti ni zelo presenetljiv. Vendar je ta vpliv pomemben tudi v enostavnih,

krajših konstrukcijah, z manj stebri, kot so npr. konstrukcije obravnavane v parametrični študiji. Parametrična študija je pokazala:



Slika 4. Pomiki viadukta s centralnim togim stebrom

- Vpliv višjih nihajnih oblik lahko pričakujemo v vseh konstrukcijah z zelo togimi stebri. Še posebej so občutljivi tisti viadukti, ki imajo toge centralne stebre (slika 4). V takšnih konstrukcijah so zelo pomembne torzijske nihajne oblike. Rezultati poenostavljene statične metode so lahko celo kvalitativno drugačni od rezultatov modalne analize. Z MA izračunani pomiki bolj togih stranskih stebrov so lahko večji od tistih na bolj podajni strani. S poenostavljeno statično metodo pa vedno dobimo večje pomike na bolj podajni strani.

- V konstrukcijah z zelo togimi stranskimi stebri, lahko vpliv višjih nihajnih oblik (upogibnih) pričakujemo na delu med opornikom in togimi stebri (slika 5).

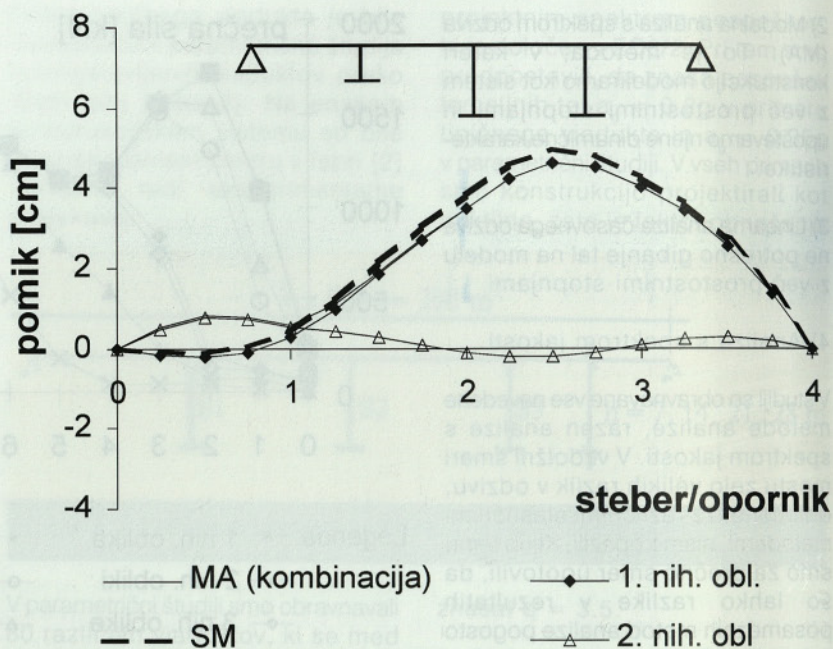
- Konstrukcije s pomičnimi podporami nad opornikoma in zelo dolgimi krajnimi konzolami so še posebej občutljive na vpliv višjih nihajnih oblik (slika 6).

3.2 Indeks regularnosti

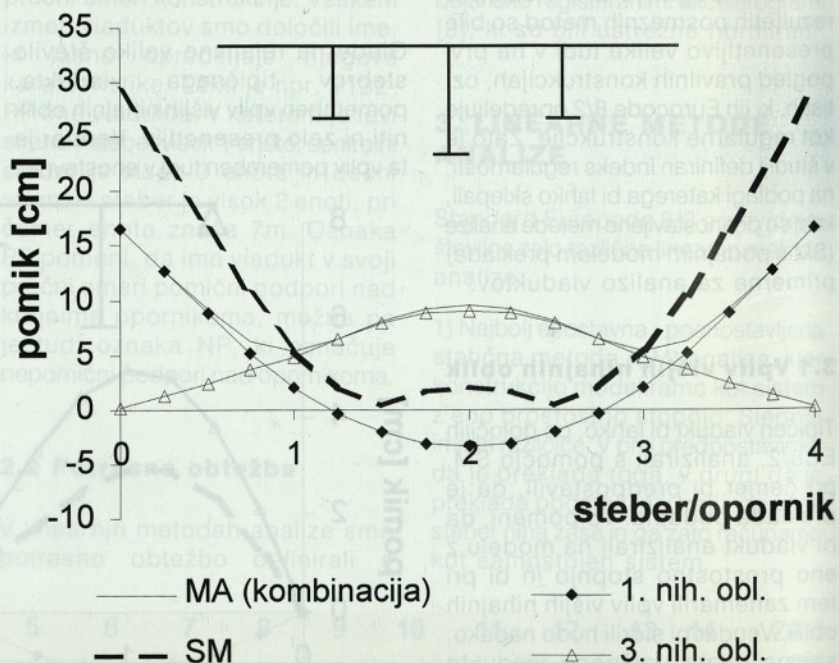
V EC8/2 je kriterij, ki definira regularnost konstrukcije, nepopoln. Zato smo predlagali nov indeks regularnosti, ki temelji na pomikih, določenih s SM. To je iterativna metoda, kjer najprej izračunamo upogibe preklade $d_{i,0}$, ki je obremenjena z obtežbo $f_i = m_i g$. Nato ocenimo nihajni čas konstrukcije, s pomočjo enačbe (1). Na podlagi pomikov $d_{i,0}$ izračunamo potresne sile F_i , s pomočjo enačbe (2). Konstrukcijo ponovno obtežimo s silami F_i in določimo nove pomike $d_{i,1}$.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum m_i d_{i,0}}{\sum f_i d_{i,0}}} \quad (1)$$

$$F_i = \frac{4\pi^2}{T^2} \frac{S_d(T)}{g} d_{i,0} m_i \quad (2)$$



Slika 5. Pomiki viadukta s stranskim togim stebrom



Slika 6. Pomik viadukta s pomičnimi podporami (v prečni smeri viadukta) nad opornikoma

V enačbah (1) in (2) je T nihajni čas konstrukcije; m_i je masa skoncentrirana v i -ti točki; $d_{i,0}$ so pomiki, ki ustrezajo obtežbi $f_i = m_i g$ (g je pospešek temeljnih tal); $S_d(T)$

je pospešek v projektnem spektru pospeškov, ki ustreza nihajnemu času T (določimo ga s pomočjo enačbe 1).

Indeks regularnosti je definiran kot relativno razmerje normiranih začetnih ($d_{i,0}$ - pomiki zaradi obtežbe $f_i = m_i g$) in končnih ($d_{i,1}$ - pomiki zaradi obtežbe F_i) pomikov približne metode in sicer:

$$INDEX = \left[\frac{\sum abs(d_{i,0} - d_{i,1})}{\sum abs(d_{i,1})} \right] \cdot 100 [\%] \quad (3)$$

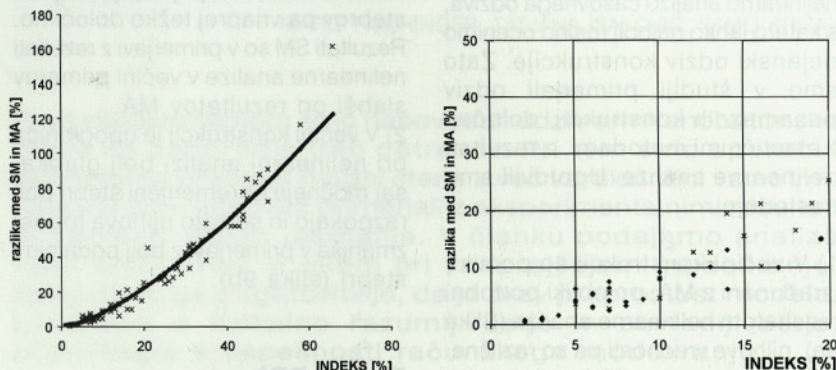
Fizikalen pomen indeksa je prikazan na sliki. Pri računu indeksa primerjamo ploščine, omejene z normiranimi upogibnicami prve in druge iteracije približne statične metode. Če so točke, v katerih računamo upogibe na enakomerni razdalji, potem namesto ploščin lahko primerjamo pomike (slika 7) s formulo (3).

Učinkovitost predlaganega indeksa smo ocenili na podlagi razlik v rezultatih SM in MA. Razlike smo določili podobno kot indeks, na podlagi relativne razlike ploščin, omejenih z upogibnicami:

$$RAZLIKA = \left[\frac{\sum abs(d_i^{SM}) - d_i^{MM}}{\sum abs(d_i^{MM})} \right] \cdot 100 [\%] \quad (4)$$

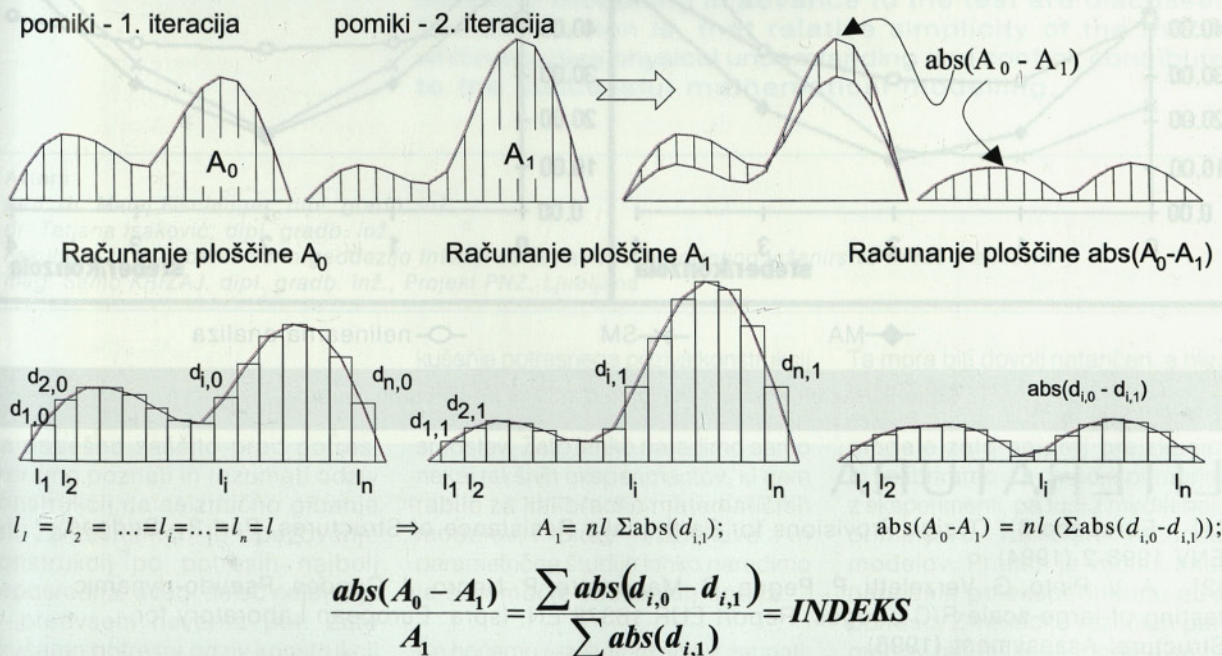
d_i^{SM} je pomik i -te točke, določen s približno metodo in d_i^{MM} je pomik i -te točke, določen z modalno analizo. Indeks smo testirali na vseh konstrukcijah, analiziranih v parametrični

študiji in na primeru tipičnega viadukta. Iz slike 8 je razvidno, da lahko odvisnost razlike med obravnavanimi metodami od predlaganega indeksa prikažemo s krivuljo, od katere posamezni rezultati ne odstopajo bistveno (raztros rezultatov je majhen). Zato lahko sklepamo, da prikazani indeks dobro določa te razlike. Iz slike 8 lahko



Slika 8. Razlika med SM in MA v funkciji predlaganega indeksa

sklepamo, da so razlike v rezultatih SM in MA manjše od 10%, če je tudi vrednost indeksa manjša od 10%.



Slika 7. Fizikalni pomen indeksa regularnosti

4. PRIMERJAVA LINEARNIH METOD ANALIZE Z NELINEARNO DINAMIČNO ANALIZO

Kot osnovna metoda analize je v EC8/2 predvidena linearna modalna analiza s spektrom odziva, vendar je to eden redkih standardov na svetu, ki eksplicitno predvideva tudi nelinearno analizo časovnega odziva, s katero lahko najbolj realno ocenimo dejanski odziv konstrukcije. Zato smo v študiji primerjali odziv posameznih konstrukcij, določen z elastičnimi metodami, z rezultati nelinearne analize. Ugotovili smo naslednje:

1) V večini konstrukcij so pomiki, izračunani z MA, po obliki podobni rezultatom nelinearne analize (Slika 9a), njihove vrednosti pa so različne. V članku so pomiki izračunani z MA, določeni ob predpostavki, da so vsi stebri nerazpokani. Pri

dejanskem odzivu pa vsak steber razpoka, zato se zmanjša njegova togost in so zato dejanski pomiki stebrov večji, kot jih določimo ob predpostavki, da so stebri nerazpokani. To kažejo tudi rezultati nelinearne dinamične analize. Torej, za natančnejšo oceno vrednosti pomikov bi morali v MA pravilno oceniti, v kolikšni meri razpoka vsak izmed stebrov. Stopnjo razpokanosti stebrov pa vnaprej težko določimo. Rezultati SM so v primerjavi z rezultati nelinearne analize v večini primerov slabši od rezultatov MA.

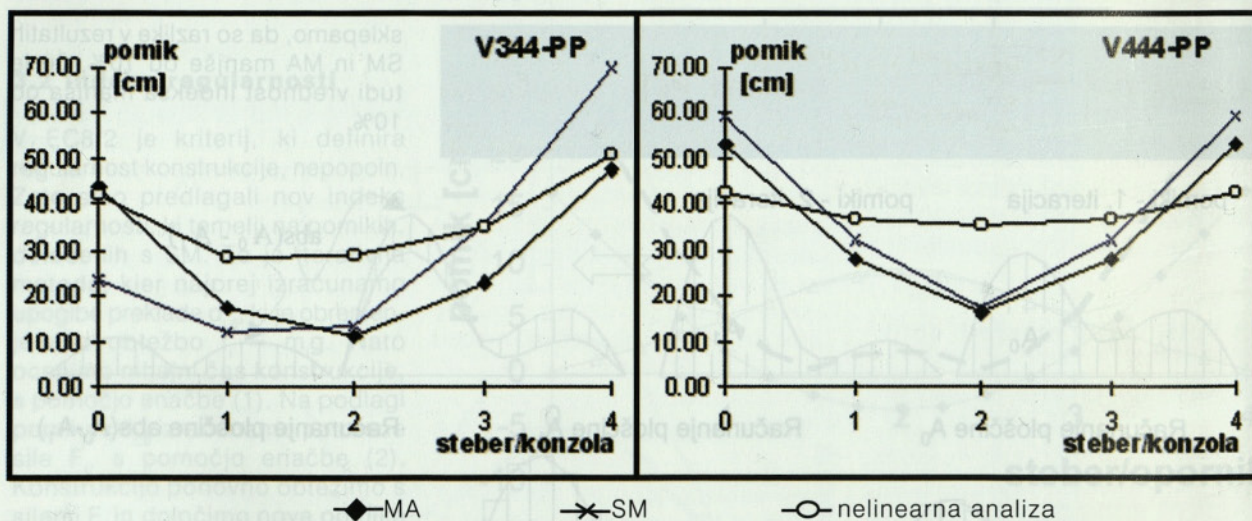
2) V večini konstrukcij je upogibnica pri nelinearni analizi bolj gladka, saj močnejše obremenjeni stebri bolj razpokajo in se zato njihova togost zmanjša v primerjavi z bolj podajnimi stebri (slika 9b).

sklepamo, da uporaba poenostavljene statične metode ni priporočljiva. To metodo lahko uporabimo le izjemoma za analizo regularnih (pravih) in manj pomembnih konstrukcij. Kot mero regularnosti bi lahko uporabili predlagani indeks regularnosti. Za večje in pomembnejše objekte obvezno uporabimo modalno analizo s spektrom odziva.

Velikost pomikov v naši projektantski praksi zelo pogosto zanemarjamo, čeprav so, še zlasti v mostogradnji, ravno tako pomembni kot sile. Za pravilno oceno pomikov moramo pri uporabi modalne analize s spektrom odziva pravilno oceniti razpokanost stebrov. Stopnjo razpokanosti težko vnaprej določimo, zato je priporočljivo, da v večjih in pomembnejših konstrukcijah pomike ocenimo s pomočjo nelinearne dinamične analize.

5. SKLEPI

Na podlagi prikazane študije lahko



Slika 9. Primerjava elastičnih metod analize z nelinearno analizo

LITERATURA

- [1] Eurocode 8 - Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures, Part 2 - Bridges, ENV 1998-2 (1994)
- [2] A. V. Pinto, G. Verzeletti, P. Pegon, G. Magonette, P. Negro, J. Guedes, Pseudo-dynamic testing of large-scale R/C bridges, Report EUR 16378 EN, Ispra: European Laboratory for Structural Assessment (1996).
- [3] T. Isaković, Razvoj metod in orodij za projektiranje stebrov armiranobetonskih viaduktov na potresnih območjih, doktorska disertacija, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 244 strani (1996).

NAPOVED POTRESNEGA ODZIVA ARMIRANOBETONSKE STENE

SEISMIC RESPONSE PREDICTION OF A RC STRUCTURAL WALL

UDK: 699.841 : 624.012.45 : 620.17

MATEJ FISCHINGER, TATJANA ISAKOVIĆ, SAMO KRIŽAJ

POVZETEK

Pred eksperimentom smo napovedali odziv armiranobetonske stene na zaporedje treh potresov. Pri tem smo uporabili razmeroma preprost model stene z več vertikalnimi vzmetmi. Kasneje smo napoved primerjali z eksperimentalnimi rezultati in ugotovili dobro ujemanje. V članku podajamo analizo vseh problemov in dilem pri vnaprejšnjem modeliranju. Zaključimo ga z ugotovitvijo, da je prav preprostost modela, povezana s fizikalno razumljivostjo in obvladljivostjo, pripomogla k uspešnosti računskega modeliranja.

SUMMARY

The response of a reinforced concrete structural wall to a sequence of three earthquakes was predicted in advance to the experiment. Relatively simple mathematical model with multiple vertical springs was used. Good correlation of numerical and experimental results was observed. Some problems and dilemmas of the mathematical modelling in advance to the test are discussed. The conclusion is, that relative simplicity of the model, which enables physical understanding and control, contributed to the successful mathematical modelling.

Avtorji:

prof. dr. Matej Fischinger, dipl. gradb. inž.,

dr. Tatjana Isaković, dipl. gradb. inž.,

Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Inštitut za konstrukcije potresno inženirstvo in računalništvo
mag. Samo KRIŽAJ, dipl. gradb. inž., Projekt PNZ, Ljubljana

1. UVOD

Za uspešno zaščito pred potresi moramo poznati in razumeti odziv konstrukcij na seizmično gibanje tal. Za ta namen je opazovanje konstrukcij po potresih najbolj neposredna, a tudi daleč najdražja in predvsem nevarna pot. Zato skušamo potresni odziv konstrukcij predvideti s pomočjo eksperimentov in računskega modeliranja. Preiz-

kušanje potresnega odziva konstrukcij v dovolj velikem merilu praviloma zahteva zelo drago opremo in veliko sredstev. Zato lahko naredimo samo nekaj takšnih eksperimentov, ki nam rabijo za kalibracijo matematičnih modelov. Širše raziskave in parametrične študije lahko naredimo le s pomočjo računskih analiz.

Če hočemo rezultatom analiz zaupati, moramo uporabiti zanesljiv in predvsem preizkušen računski model.

Ta mora biti dovolj natančen, a hkrati dovolj enostaven, da ga lahko kontroliramo. Izbrane matematične modele zato najprej preizkusimo in kalibriramo s pomočjo primerjave z eksperimenti, pa tudi z medsebojno primerjavo različnih računskih modelov. Pri tem je večina analiz narejenih po eksperimentu ali po potresu. Z variacijo različnih parametrov računskega modela se bolj ali manj približamo izmerjenim rezultatom in pri tem pridobivamo

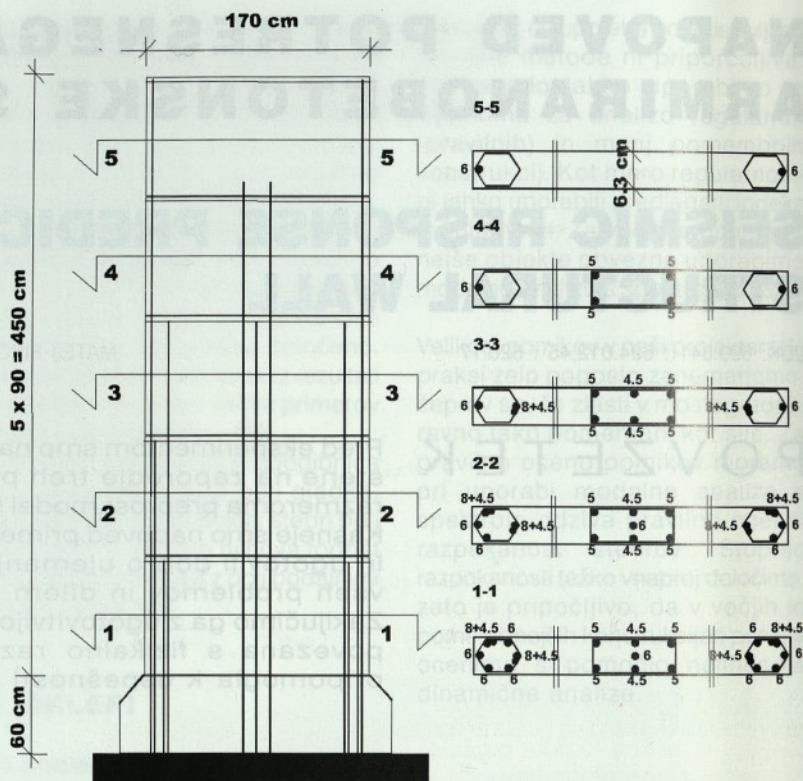
občutek za delovanje modela. Vendar pa ob takšnem, naknadnem preverjanju modela vedno obstaja dvom o njegovi uspešnosti pri napovedi obnašanja konstrukcije v primerih, ko nam izmerjeni rezultati še niso poznani. Mnogo bolj indikativne so zato vnaprejšnje (angl. benchmark) študije. Pri teh organizator razdeli udeležencem vse potrebne podatke o eksperimentu, rezultate eksperimenta pa objavi šele potem, ko so analize že narejene in oddane.

V preteklih dveh letih smo imeli priložnost sodelovati v takšni vnaprejšnji študiji potresnega odziva konzolne armiranobetonske stene (poglavje 2). V analizi smo uporabili računski model stene z več vertikalnimi vzmetmi (poglavje 3), ki smo ga v zadnjem desetletju razvijali na našem Inštitutu. Model je bil prej že uspešno uporabljen [1], vendar vedno le za simulacijo po eksperimentih. V poglavju 4 razpravljamo o dilemah pri vnaprejšnji izbiri parametrov modela, v poglavju 5 pa predstavljamo rezultate.

2. ZASNOVA PROJEKTA IN EKSPERIMENTA

Francoski komisariat za atomsko energijo je leta 1997 razpisal vnaprejšjo študijo potresnega odziva armiranobetonske (AB) stene na močno potresno obtežbo z naslovom »CAMUS Benchmark« [2]. CAMUS je kratica za francosko oznako »Conception et Analyse des Murs sous Seisme«, ki pomeni zasnovo in analizo sten na potresnih območjih. Za sodelovanje se je prijavilo 26 raziskovalnih inštitucij iz vsega sveta, od katerih jih je 11 študijo tudi pravočasno oddalo.

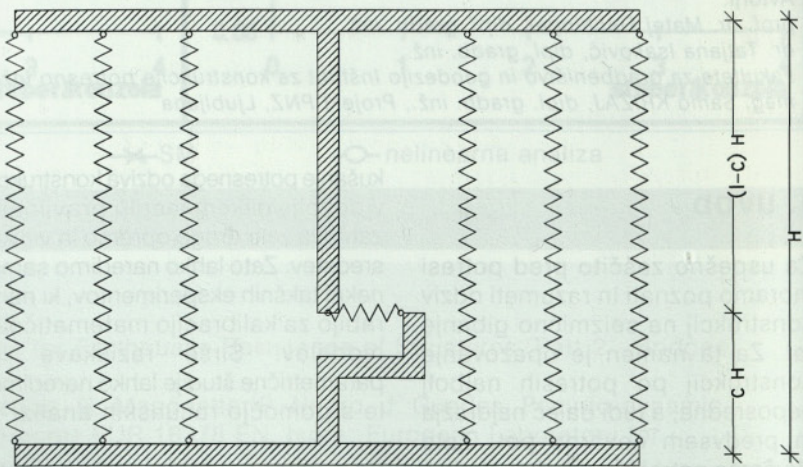
Preizkušena je bila petnadstropna konzolna AB stena v merilu 1:3 (slika 1). Stena je bila projektirana po francoskih predpisih in zelo šibko ter nenavadno armirana. To je pomenilo še poseben izziv za testiranje našega računskega modela, ki je bil do takrat preizkušen le na standardno armiranih stenah. Arma-



Slika 1. Shema stene

tura je bila položena samo na obeh vogalih in v sredini stene. Izbrana je bila karakteristična meja elastičnosti armature 500 MPa in tlačna trdnost betona 20 MPa. Dejanski diagrami napetost-deformacija, ki so precej odstopali od karakterističnih vrednosti, so bili v času analize udeležencem že poznani.

V eksperimentu so zaporedoma uporabili sintetične akceleroграme treh različnih jakosti: CAMUS02 (z maksimalnim pospeškom tal $a_{gmax} = 0.24g$), CAMUS17 ($a_{gmax} = 0.40g$) in CAMUS19 ($a_{gmax} = 0.71g$). Pospeški so navidez visoki, ker so prirejeni pomanjšanemu merilu modela.



Slika 2. Računski model MVLEM

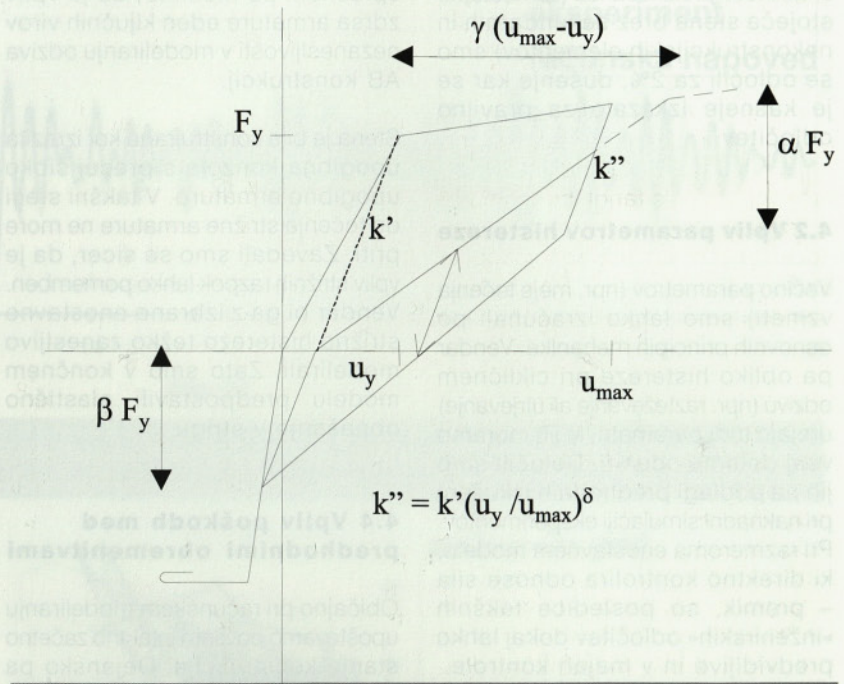
Posamezni udeleženci študije so se morali odločiti za en sam računski model in z njim izračunati neelastični dinamični odziv stene na vse tri obtežbe. Zaželeno je bila tudi napoved poškodb in rušnega mehanizma.

3. RAČUNSKI MODEL

Uporabili smo element MVELM (angl. multiple-vertical-line-element-model), ki je prikazan na sliki 2. Sestavlja ga 6 navpičnih vzmeti, ki opisujejo upogibno in osno obnašanje. Za vzmeti smo razvili histerezna pravila, ki so prilagojena osno obremenjenemu AB stebru (slika 3). Obnašanje elementa v strigu določa strižna vzmet. Njeno obnašanje opisuje bilinearna histereza z zdrsom. Element smo vgradili v program DRAIN-2D [3], ki se zelo pogosto uporablja za nelinearno analizo v potresnem inženirstvu.

4. IZBIRA RAČUNSKIH PARAMETROV

Pri vnaprejšnji napovedi se srečamo s številnimi problemi, ki jih pri naknadnih analizah pogosto spregledamo. Vendar pa nam prav te dileme, ki jih nekaj obravnavamo v naslednjih razdelkih, razkrijejo



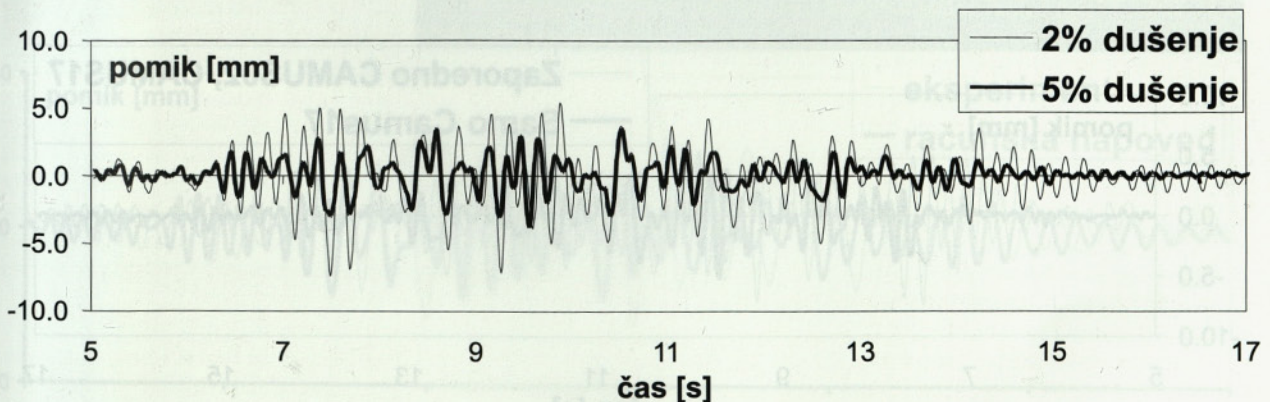
Slika 3. Histerezna pravila za navpične vzmeti.

dejanske zmožnosti in morebitne pomanjkljivosti računskega modela.

4.1 Vpliv viskoznega dušenja

Absolutno velikost viskoznega dušenja in njegov relativni vpliv glede na histerezo dušenje težko ocenimo.

V potresnem inženirstvu običajno upoštevamo 2% ali 5% viskozno dušenje. V preliminarinih analizah smo zato uporabili obe vrednosti. Pri pretežno elastičnem odzivu (npr. CAMUS17, slika 4) je bila razlika precejšnja, pri močnem neelastičnem odzivu, kjer prevladuje histerezo dušenje, pa manjša. Glede na



Slika 4. Časovni potek pomika na vrhu stene pri potresu CAMUS17. Primerjava za 2% in 5% viskoznega dušenja.

značilnosti preizkušanca (samostojno stoječa stena brez sekundarnih in nekonstrukcijskih elementov) smo se odločili za 2%, dušenje kar se je kasneje izkazalo za pravilno odločitev.

4.2 Vpliv parametrov histereze

Večino parametrov (npr. meje tečenja vzmeti) smo lahko izračunali po osnovnih principih mehanike. Vendar pa obliko histereze pri cikličnem odzivu (npr. razteževanje ali utrjevanje) urejajo tudi parametri, ki jih moramo vsaj deloma oceniti. Določili smo jih na podlagi predhodnih izkušenj pri naknadni simulaciji eksperimentov. Pri razmeroma enostavnem modelu, ki direktno kontrolira odnose sila – premik, so posledice takšnih »inženirskih« odločitev dokaj lahko predvidljive in v mejah kontrole.

4.3 Vpliv zdrsa armature ob vpetju v temelj in vpliv neelastičnega striga

Oba vpliva, ki sta značilna za AB konstrukcije, »zmehčata« model in vodita do večjih deformacij.

V nasprotju s pričakovanjem smo izračunali, da konstrukcijski detajl sidranja armature v temelj preprečuje večje zdrse. Zato tega vpliva nismo upoštevali v končnem modelu. V

splošnem pa menimo, da je vpliv zdrsa armature eden ključnih virov nezanesljivosti v modeliranju odziva AB konstrukcij.

Stena je bila konstruirana kot izrazita upogibna konzola s precej šibko upogibno armaturo. V takšni steni do tečenja strižne armature ne more priti. Zavedali smo se sicer, da je vpliv strižnih razpok lahko pomemben. Vendar bi ga z izbrano enostavno strižno histerezo težko zanesljivo modelirali. Zato smo v končnem modelu predpostavili elastično obnašanje v strigu.

4.4 Vpliv poškodb med predhodnimi obremenitvami

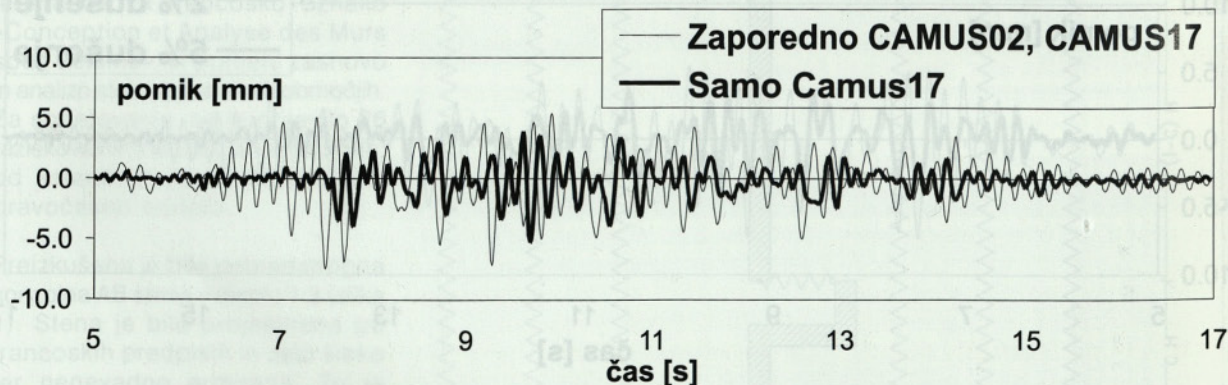
Običajno pri računskem modeliranju upoštevamo povsem intaktno začetno stanje konstrukcije. Dejansko pa konstrukcija med samo gradnjo in pri drugih obtežbah (tudi pri šibkih potresih) že pred nastopom močnega potresa utрпи manjše poškodbe. Te na zunaj največkrat sploh niso vidne, vendar pomembno vplivajo na odziv. To smo ugotovili tudi v naših začetnih študijah. Z obtežbo CAMUS17 smo najprej obremenili intaktno steno. Za primerjavo smo steno obremenili zaporedoma z obtežbama CAMUS02 in CAMUS17. Odziva za CAMUS17 (slika 5) sta v obeh primerih očitno različna, kar kaže, da je že zelo šibak potres

CAMUS02 dokaj poškodoval konstrukcijo. Čeprav so bile razlike pri zelo močnih poškodbah med potresom CAMUS19 manjše, smo v kasnejši študiji uporabili zaporedje vseh treh potresov.

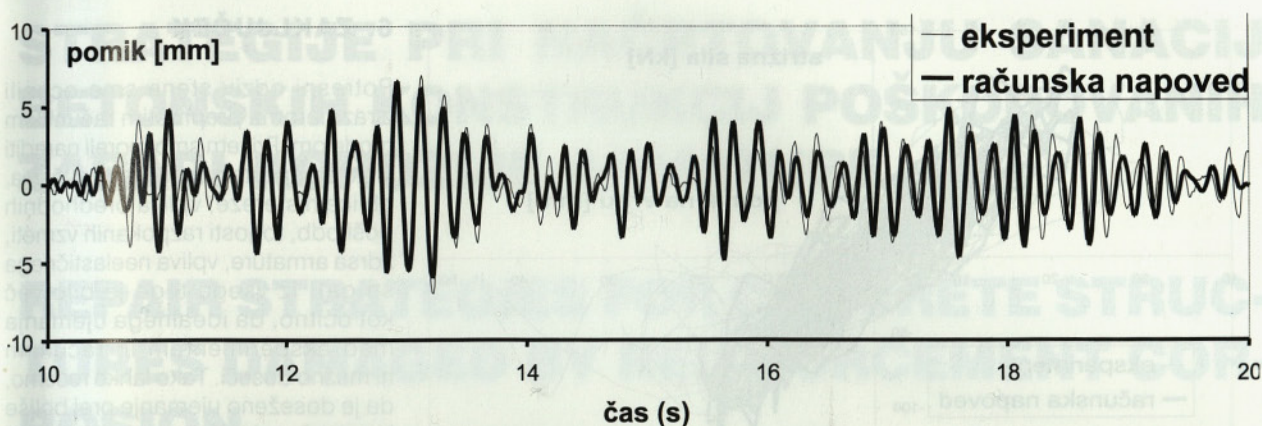
5. REZULTATI IN PRIMERJAVA Z EKSPERIMENTOM

Po objavi eksperimentalnih rezultatov smo lahko ugotovili, da je bila napoved časovnega poteka pomika (slika 6) in histereze stene (slika 7) za šibkejši potres CAMUS02 zelo dobra. Pri tej obtežbi še ni prišlo do tečenja armature, stopnja razpokanosti navpičnih vzmeti (povprečna vrednost za polno razpokan in nerazpokan prerez) pa je bila očitno dobro ocenjena.

Ujemanje za najmočnejši potres CAMUS19 je zadovoljivo (sliki 8 in 9) in med boljšimi v primerjavi z ostalimi udeleženci študije [2]. Ujemanje je dobro zlasti prvih 11 sekund odziva. Računski pomiki so sicer nekaj manjši od izmerjenih. Za to sta razloga zanemaritev neelastičnega striga in neupoštevanje vpliva vertikalnih pospeškov, lahko pa tudi neupoštevanje zdrsa armature. Okoli 11. sekunde se je v eksperimentu očitno dogodilo nekaj, česar uporabljeni model z izbranimi parametri ni pokazal. Dejansko je



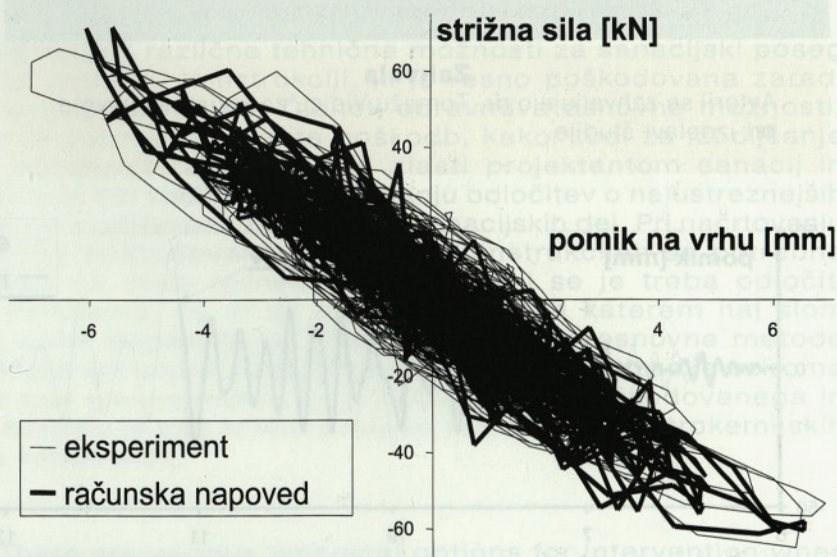
Slika 5. Časovni potek pomika na vrhu stene pri potresu CAMUS17. Študij vpliva predhodnih poškodb zaradi potresa CAMUS02.



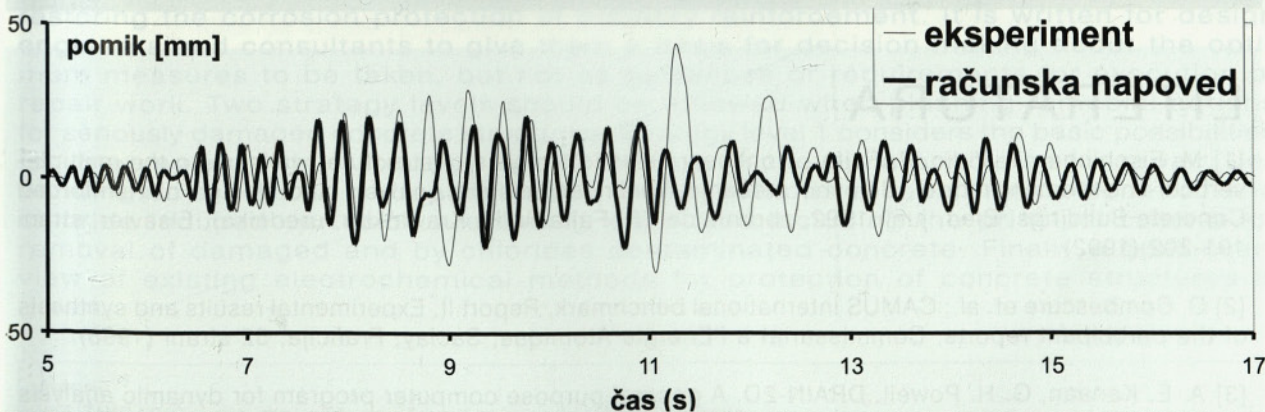
Slika 6. Časovni potek pomika na vrhu stene pri šibkem potresu CAMUS02. Primerjava računske napovedi in eksperimenta.

prišlo do porušitve stene v tretji etaži. Steno je obdržal le okolišnji okvir pri eksperimentu.

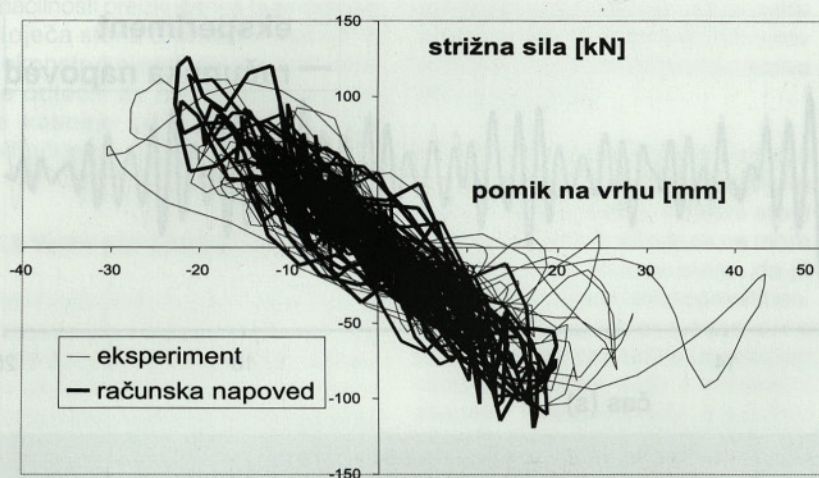
To porušitev smo tudi vnaprej predvideli, vendar pri rahlo močnejšem potresu ($a_{gmax} = 0.79g$; slika 10). Stena je namreč statično določena in brez porazdeljene armature. Takšen sistem je po plastifikaciji robne armature precej labilen in občutljiv za parameter utrjevanja. Do porušitve je prišlo v višji etaži na mestu prekinitev dela armature. Projektanti so namreč z armaturo natančno sledili poteku črte upogibnih momentov (kar sodobni predpisi, npr. Eurocode, ne dovoljujejo).



Slika 7. Histereza stene pri šibkem potresu CAMUS02. Primerjava računske napovedi in eksperimenta.



Slika 8. Časovni potek pomika na vrhu stene pri močnem potresu CAMUS19. Primerjava računske napovedi in eksperimenta.



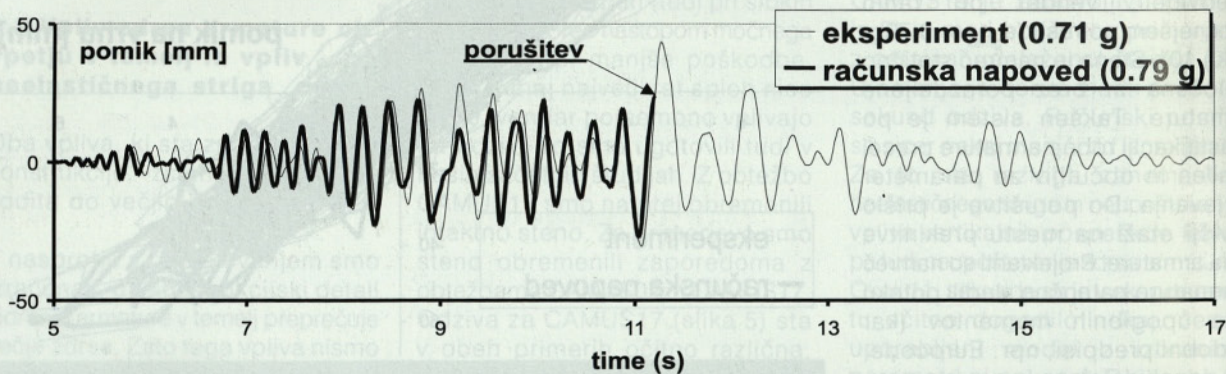
Slika 9. Histereza stene pri močnem potresu CAMUS19. Primerjava računske napovedi in eksperimenta.

Zahvala

Avtorji se zahvaljujejo dr. Tomažu Vidicu za koristne nasvete pri izdelavi študije.

6. ZAKLJUČEK

Potresni odziv stene smo ocenili z razmeroma preprostim računskim modelom. Pri tem smo morali narediti vrsto predpostavk (npr. glede dušenja, oblike histereze, vpliva predhodnih poškodb, togosti razpokanih vzmeti, zdrsa armature, vpliva neelastičnega striga). Iz vsega tega je bilo več kot očitno, da idealnega ujemanja med eksperimentom in računom ni možno doseči. Tako lahko rečemo, da je doseženo ujemanje prej boljše kot slabše od pričakovanega. Vnaprej smo uspeli napovedati velikost in časovni potek pomikov, obliko histereze in tudi nevarnost porušitve v okolici enajste sekunde potresa CAMUS19. Menimo, da je bila preprostost modela pri tem zaradi lahke obvladljivosti prej v pomoč kot ovira.



Slika 10. Računska napoved porušitve.

LITERATURA

- [1] M. Fischinger, T. Vidic, P. Fajfar, Nonlinear seismic analysis of structural walls using the multiple-vertical-line-element model, delovno srečanje Nonlinear Seismic Analysis and Design of Reinforced Concrete Buildings, Bled, junij 1992, zbornik del (P. Fajfar in H. Krawinkler, urednika), Elsevier, strani 191-202 (1992).
- [2] D. Combesure et. al., CAMUS international benchmark, Report II: Experimental results and synthesis of the participant reports, Commissariat a l'Energie Atomique, Saclay, Francija, 52 strani (1998).
- [3] A. E. Kanaan, G. H. Powell, DRAIN-2D, A general purpose computer program for dynamic analysis of planar structures, Report No.UBC/EERC-73/6, University of California, Berkeley (1973).

STRATEGIJE PRI NAČRTOVANJU SANACIJ BETONSKIH KONSTRUKCIJ POŠKODOVANIH ZARADI KOROZIJE ARMATURE

REPAIR STRATEGIES FOR CONCRETE STRUCTURES DAMAGED BY REINFORCEMENT CORROSION

UDK: 624.012.4 : 620.193

JAN ŽNIDARIČ, BARBARA TREPPO-MEKIŠ, ANDRAŽ LEGAT

POVZETEK Obstajajo različne tehnične možnosti za sanacijski poseg na betonski konstrukciji, ki je resno poškodovana zaradi korozije armature. Članek obravnava osnovne možnosti, strategije, načela in metode za popravilo te vrste poškodb, kakor tudi za izboljšanje ali obnovo zaščite jekla za armiranje. Namenjen je zlasti projektantom sanacij in strokovnim sodelavcem investitorja kot vodilo pri sprejemanju odločitev o najustreznejših ukrepih, in ni mišljen kot smernica z zahtevami za izvajanje sanacijskih del. Pri načrtovanju sanacijskih ukrepov na močnejše poškodovanih betonskih konstrukcijah se potrebne strateške odločitve sprejemajo na dveh ravneh. Na prvi ravni se je treba odločiti med osnovnimi možnostmi ukrepanja, na drugi pa za načelo, na katerem naj sloni metoda popravila, glede na vzrok depasivacije. Kratko so opisane osnovne metode saniranja poškodb zaradi korozije armature, če je ta posledica karbonatizacije oziroma prodora kloridov. Podana so tudi glavna merila za odstranjevanje poškodovanega in s kloridi okuženega betona. Končno je dan kratek pregled obstoječih elektrokemijskih metod za zaščito betonskih konstrukcij.

SUMMARY There are various technical options for intervention when a concrete structure is seriously damaged by steel corrosion. The paper discusses the basic options, strategies, principles and methods for repairing this type of damages, and, for improving or restoring the corrosion protection of ordinary reinforcement. It is written for design engineers and consultants to give them a basis for decision making about the optimum measures to be taken, but not as guidelines or requirements for execution of repair work. Two strategy levels should be followed when planning remedial actions for seriously damaged concrete structures. Strategy level 1 considers the basic possibilities for intervention, while strategy level 2 deals with the main principles for repair, depending on the cause of depassivation. Basic methods of repair for carbonation and chloride induced corrosion are shortly described including the principal criteria for removal of damaged and by chlorides contaminated concrete. Finally a brief overview of existing electrochemical methods for protection of concrete structures is given.

Avtorji:

Jaš ŽNIDARIČ, univ. dipl. inž. gr., Zavod za gradbeništvo Slovenije

Mag. Barbara Treppo - Mekiš, univ. dipl. inž. gr., Zavod za gradbeništvo Slovenije

Dr. Andraž Legat, univ. dipl. inž. fiz., Zavod za gradbeništvo Slovenije

1. Uvod

Sanacija je gradbeni poseg za odpravo posledic poslabšanja stanja oz. propadanja (ang. *deterioration*) konstrukcije. Pojavne oblike poslabšanja stanja betonskih konstrukcij so:

- poškodbe (ang. *damage*) betona zaradi mehanskih, fizikalnih in kemijskih agresivnih vplivov na beton,
- poškodbe armature zaradi koroziije,

- slaba mesta ali hibe (ang. *deficiency*) v betonu zaradi napak pri gradnji,
- nepredvidene deformacije in premiki elementov konstrukcije.

Vzroki propadanja so lahko poslabšane lastnosti oz. staranje vgrajenih materialov zaradi delovanja okolja, v katerem se konstrukcija nahaja, napake v projektu konstrukcije ali pa napake pri gradnji, vzdrževanju in uporabi konstrukcije. Prvi pogoj za kakovostno sanacijo betonskih

konstrukcij je poznavanje kritičnih procesov oz. dogodkov, ki so povzročili propadanje, in katerih ponovni pojav je treba s sanacijo preprečiti.

Vrste sanacijskih ukrepov so povezane s cilji, ki jih želimo s sanacijo doseči. Zanje so se uveljavili naslednji nazivi in definicije /1/:

Popravilo-Obnova
(ang. *repair*)

Propadanje konstrukcije se ustavi ali le upočasni brez znatnejšega dviga obstoječe ravni zanesljivosti (varnosti in uporabnosti). Cilj ukrepa ni doseči začetno zanesljivost in trajnost konstrukcije ali njenih delov.

Prenova
(*reconstruction, rehabilitation*)

S kakršnimi koli materiali ali postopki se doseže začetna ali višja raven zanesljivosti poškodovane ali drugače neustrezne konstrukcije ali njenega dela.

Prenovitev
(*renewal*)

Začetna ali višja raven zanesljivosti poškodovane ali drugače neustrezne konstrukcije ali njenega dela se doseže s prvotnimi materiali in postopki.

Zgodovinska prenova
(*restoration*)

Konstrukcija ali njen del se povrne v začetno stanje, tudi glede njenega estetskega videza in zgodovinskega pomena.

Posodobitev-Modernizacija
(*remodelling*)

Spremembe na konstrukciji omogočajo izpolnitev dopolnilnih, višjih zahtev za obnašanje in rabo konstrukcije.

Ojačitev
(*strengthening*)

Povečanje nosilnosti konstrukcije ali njenih elementov, da se izboljšata osnovna varnost in tudi robustnost konstrukcije. Robustnost pomeni posebno sposobnost konstrukcije, da na mestu poškodb oz. ob poškodovanih nosilnih elementih aktivira alternativne poti za prenos obtežb in se na ta način izkoristi rezervna varnost konstrukcije.

Utrditev
(*retrofitting*)

Povečanje zanesljivosti konstrukcije ali njenega dela, da bi se v bodočnosti izboljšalo njeno obnašanje. Vključuje lahko tudi spremembo prvotne oblike konstrukcije ali njenih elementov. Izraz se uporablja zlasti za ojačitev na potresne obremenitve, da bi se preprečile oz. omejile poškodbe pri bodočih potresih.

Izboljšava
(*upgrading*)

Konstrukcija se prilagodi novim zahtevam, da bi se izboljšale njene funkcije.

Zamenjava
(*replacement*)

Poškodovana, izrabljena ali drugače neustrezna konstrukcija ali njen element se zamenja z novim, pri čemer se njegova funkcija v konstrukciji ne spremeni.

Pri vsaki zahtevnejši sanaciji mora projektant sprejeti dve strateški odločitvi, ki se nanašata na:

- določitev sanacijskega ukrepa, ki je po presoji vseh relevantnih vplivnih faktorjev najprimernejši glede na stanje konstrukcije in druge okoliščine; možni sanacijski ukrepi so opisani v tč. 2.1.2, najpomembnejši vplivni faktorji na to odločitev pa so navedeni v tč. 2.1.3;
- izbiro načela saniranja, ki na optimalen način omogoči izpeljavo izbranega ukrepa; načela saniranja so naštetja v tč. 3.2 - Pregl. 2.

Vsakemu načelu saniranja ustreza več metod oz. možnih načinov izvedbe. Primeri bolj ali manj uveljavljenih metod saniranja v skladu s posameznimi načeli so podani v Preglednici 3. Projektant sanacije mora med njimi poiskati optimalno rešitev.

Ključne faze pri načrtovanju sanacij na večjih in pomembnejših betonskih konstrukcijah so:

- 1) ugotovitev in ocena stanja konstrukcije vključno z identifikacijo vzrokov poškodovanosti in oceno zmanjšanja zahtevanih lastnosti,
- 2) strateška odločitev 1. ravni - o najustreznem sanacijskem ukrepu,
- 3) strateška odločitev 2. ravni - o najustreznem načelu saniranja,
- 4) izbira metode sanacije, ki najbolje ustreza izbranemu načelu saniranja.

Za izbrano metodo sanacije pa je nato treba:

- oceniti varnost in pričakovano življenjsko dobo sanirane konstrukcije,
- določiti zahtevane lastnosti proizvodov in sanacijskih sistemov, ki se bodo uporabili,
- predpisati postopke notranje kontrole izvajalca in potrjevanja skladnosti proizvodov in opravljenih del,
- določiti in predpisati zahteve za vzdrževanje in opazovanje

sanirane konstrukcije,

- izdelati poskusno polje, če je potrebno.

Sestavek podaja predvsem tehnične osnove za sprejemanje strateških odločitev v zvezi z določitvijo najbolj ustreznega ukrepa in izbiro načela saniranja pri načrtovanju sanacij poškodb, ki so posledica korozije armature. Te poškodbe so na armiranobetonskih in prednapetih betonskih konstrukcijah namreč najbolj pogoste in zahtevajo najbolj obsežne in zahtevne sanacijske ukrepe. Sestavek obravnava tudi glavne metode popravil, ki slonijo na opisanih načelih, ne vsebuje pa navodil za izvajanje posameznih postopkov popravil, ki temeljijo na teh metodah.

2. Strategija 1. ravni – odločitev o ukrepu

2.1 Splošno

2.1.1 UGOTOVITEV STANJA

Odločitev o najustreznem ukrepu, ki mora v danih okoliščinah na najbolj optimalen način ponovno zagotoviti potrebno zanesljivost konstrukcije, se sprejema na podlagi ocene stanja konstrukcije.

Ugotavljanje in ocenjevanje stanja obstoječih konstrukcij (ang. *structural assessment*) ter postopki za identifikacijo vzrokov poškodovanosti so podrobno obdelani v /1/ in /2/. Za sprejetje odločitve o ukrepu so pomembni zlasti naslednji podatki o stanju in uporabi konstrukcije:

- stopnja poškodovanosti, določena na podlagi:
 - opisa ter ocene jakosti in razširjenosti vidnih in tudi nevidnih poškodb,
 - vzrokov za nastanek posameznih poškodb,
 - predvidevanja možnih novih in tendence večanja že ugotovljenih poškodb,
 - ocene vpliva pomembnejših poškodb na varnost, uporabnost in trajnost konstrukcije;

- dejanski pogoji uporabe konstrukcije, npr. dejanske obtežbe zaradi prometa na mostu;
- dejanski pogoji okolja v katerih se nahaja konstrukcija in prevladujoči agresivni vplivi na elemente konstrukcije;
- ocena varnosti, uporabnosti in preostale življenjske dobe konstrukcije v običajnih pogojih vzdrževanja, če se popravilo ne bi izvršilo;
- morebitne rezerve v nosilnosti konstrukcije;
- potrebni obseg popravil;
- kritične poškodbe, ki zahtevajo nujne začasne ukrepe (npr. začasno podpiranje ali omejitev koristne obtežbe) za zagotovitev varnosti in uporabnosti konstrukcije in za zavarovanje uporabnikov in okolja.

2.1.2 MOŽNE ODLOČITVE

Če takojšen poseg za preprečitev porušitve ali večje škode ni potreben, se je mogoče odločiti za enega od naslednjih osnovnih ukrepov:

1. odložitev ukrepanja, po potrebi samo popravilo videza površine,
2. popravilo oz. obnova konstrukcije, po izbranem načelu in metodi saniranja, brez bistveno izboljšane obnašanja oz. povečane zanesljivosti konstrukcije,
3. prenova, ojačitev ali utrditev konstrukcije po izbranem načelu in metodi saniranja, ki prinaša bistveno izboljšanje obnašanja oz. večjo zanesljivost konstrukcije,
4. zamenjava konstrukcije, t.j. odstranitev obstoječe in izgradnja nove konstrukcije.

V primeru odloženega ukrepanja je morda potrebno omejiti uporabnost (npr. dovoljeno nosilnost) in/ali funkcionalnost (npr. širino mostu) konstrukcije in organizirati opazovanje njenega obnašanja med nadaljnjo uporabo. Na ta način se pridobijo

tudi dodatne informacije o obsegu, vzrokih in nadaljnjem večanju poškodb in podatki za analizo dejanske varnosti in uporabnosti konstrukcije. S temi podatki je tudi mogoče dodatno utemeljiti sprejeto odločitev o ukrepanju oz. izbrano metodo sanacije.

2.1.3 VPLIVNI FAKTORJI PRI ODLOČANJU

Odločitev o najustreznejšem ukrepu je odvisna od:

- stanja konstrukcije,
- nujnosti ukrepanja glede na stanje konstrukcije,
- pričakovanega obnašanja sanirane konstrukcije,
- izvedbenih možnosti,
- posledic za uporabnike in okolje,
- ekonomskih vidikov.

Gornji vrstni red ne izraža pomembnosti posameznih vplivnih faktorjev. Vedno je treba analizirati vse vplive, ki so relevantni za konstrukcijo in okoliščine v katerih se ta nahaja. Pogosto imajo odločujoči pomen politična merila, ki pa v tem pregledu niso zajeta. V nadaljevanju je pomen in smisel gornjih vplivnih faktorjev razčlenjen in pojasnjen z vprašanji, na katera je treba odgovoriti v procesu iskanja najustreznejše rešitve.

STANJE KONSTRUKCIJE

Vprašanja pri vseh vrstah poškodb so:

- stopnja poškodovanosti konstrukcije in prevladujoči vzroki poškodb,
- obseg nepoškodovanega dela konstrukcije,
- posledice poškodb na varnost, preostalo življenjsko dobo, nameravano rabo in izgled konstrukcije,
- ocena varnosti in preostale življenjske dobe konstrukcije v zatečenem stanju,
- možni obseg porušitve konstrukcije: lokalno ali širše,

- dejanski vplivi okolja na konstrukcijo.

V primeru korozije armature velja postaviti še naslednja vprašanja, povezana z vzroki in razširjenostjo korozijskih poškodb:

- obseg korozijskih poškodb in depasivacije armature,
- pretežni vzrok korozije: karbonatizacija ali prodor kloridov,
- prevladujoči mehanizmi transporta agresivnih snovi (tekočin, plinov) v betonu: vpijanje, difuzija, razpoke,
- ali je korozija posledica zelo agresivnega delovanja okolja ali slabega projektiranja, detajliranja in/ali izvedbe del?

NUJNOST UKREPANJA GLEDE NA STANJE KONSTRUKCIJE

Presoditi je treba, ali je

- potrebno sanacijo izvesti takoj, da se prepreči nadaljnje znatno poslabšanje stanja ali celo nenadna porušitev konstrukcije,
- možna začasna odložitev sanacije, ker se poškodbe le počasi večajo in širijo oz. je predvidena spremba vplivov okolja,
- večji poseg nesmiseln, ker je preostali čas uporabe konstrukcije razmeroma kratek.

PRIČAKOVANO OBNAŠANJE SANIRANE KONSTRUKCIJE

Opredeľjujejo ga:

- pričakovana preostala življenjska doba sanirane konstrukcije in zahteve, ki morajo biti zato izpolnjene, n.pr. parametri trajnosti uporabljenih materialov,
- morebitna sprememba obtežbe in dinamičnih vplivov na konstrukcijo med sanacijo in po njej ter način prevzemanja in raznosa obtežbe po opravljeni sanaciji,
- možnosti kasnejših posegov za ponovno vzpostavitev primerne zanesljivosti konstrukcije, npr. dodatna zaščita, ponovno popravilo,
- potreba po pogostejšem opazovanju objekta,

- videz popravljene konstrukcije,
- morebitni moteči vpliv sanacije na okolico.

IZVEDBENE MOŽNOSTI

Pogojujejo jih:

- možnosti izpolnitve postavljenih zahtev za materiale in kakovost izvedbe,
- razpolaganje s potrebno opremo in usposobljeno delovno silo,
- razpoložljivi čas za popravilo,
- dostopnost poškodovanih mest za izvedbo popravila in za kasnejše vzdrževanje,
- potreba po dodatnem podpiranju konstrukcije, med potekom sanacije, če bi bili njeni kritični nosilni prerezi začasno oslabiljeni.

POSLEDICE ZA UPORABNIKE IN OKOLJE

Mednje štejejo:

- nevarnosti za uporabnike in mimoidoče zaradi obstoječih poškodb, zlasti zaradi padajočih kosov odlomljenega betona,
- posledice morebitne nenadne porušitve za varnost ljudi in premoženja ter za okolje,
- moteči postopki popravila, (n.pr. peskanje, odstranjevanje betona z vodnim pritiskom),
- motenje prometa zaradi delne zapore mostu med izvajanjem sanacije ali obvoza pri popolni zaporu.

EKONOMSKI VIDIKI SANACIJE

1. Splošna gospodarska ocena sanacije, s katero se pretehta
 - pomembnost objekta za gospodarstvo ali javno življenje, npr. pomen mostu v cestni mreži,
 - gospodarske posledice neustreznega stanja objekta, n.pr. zaradi zapore mostu.
2. Celotni stroški sanacije, ki jih sestavljajo:
 - neposredni stroški: izvedbe, vzdrževanja in morebitnega opazovanja sanirane konstrukcije ter vnaprej načrtovanih kasnejših popravil,
 - posredni stroški: uporabnikov

(npr. zaradi začasnega obvoza), obremenjevanja okolja ipd. **dodatni stroški:** zaradi povečanega obsega poškodovanosti v primeru odložitve sanacije.

3. Izračun rentabilnosti sanacije, ki se izdela na podlagi analize stroškov in donosa sanacije (*cost/benefit analysis*).

2.1.4 SPREJETJE ODLOČITVE

Podlaga za sprejetje odločitve o najustreznejšem ukrepu naj bo optimizacijska analiza celotnih stroškov sanacije v odvisnosti od dosežene ravni zanesljivosti sanirane konstrukcije. Z njo se na podlagi tehnične in finančne obdelave posameznega sanacijskega ukrepa, ugotovijo optimalni celotni stroški sanacije in pripadajoča optimalna raven zanesljivosti konstrukcije, ki jo je smiselno ohranjati v načrtovani preostali življenjski dobi (slika 1). Celotni stroški so vsota:

- stroškov za osnovni sanacijski poseg, ki zagotavlja določeno stopnjo zanesljivosti sanirane konstrukcije, in
- stroškov za ohranitev približno enake zanesljivosti v preostali življenjski dobi konstrukcije, ki sestojijo iz stroškov normalnega vzdrževanja in stroškov načrtovanih naknadnih posegov.

Optimizacijska analiza stroškov za doseganje določene stopnje zanesljivosti naj se izdela za vsak sanacijski ukrep, ki je v danih okoliščinah izvedljiv in smisel, pri popravilih in prenovah je koristno za ta namen obdelati tudi več različnih metod popravila.

Raven zanesljivosti betonske konstrukcije se v tej zvezi ocenjuje zlasti z vidika trajnosti in preostale življenjske dobe sanirane konstrukcije. Zato je odvisna predvsem od zaščitenosti armature pred ponovno korozijo, ki se stopnjuje z:

- večanjem debeline in boljše

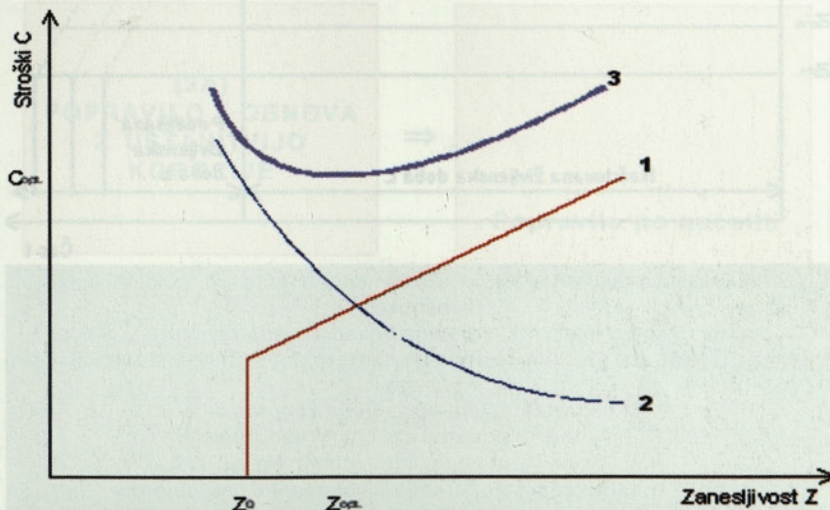
kakovostjo (neprepustnostjo) zaščitnega sloja betona nad armaturo,

- večstopenjsko zaščito, ki jo omogočajo zaščitni premazi površine betona in/ali armature ter dodatna hidroizolacija,
- izboljšavo konstrukcijskih detajlov.

Pri tem je treba upoštevati, da je načrtovano zanesljivost v večini

prihranjeni kapital obrestuje. Ker se stopnja poškodovanosti s časom običajno poveča, so stroški izvedbe odloženih popravil praviloma višji.

Merilo za končni izbor metode sanacije je rentabilnost ukrepa. Običajno se izrazi z razmerjem med celotnimi stroški sanacijskega ukrepa, s katerim se vzpostavi in ohranja načrtovana optimalna stopnja zanesljivosti



Slika 1. Določitev optimalne stopnje zanesljivosti sanirane konstrukcije
1: stroški osnovnega sanacijskega posega
2: stroški vzdrževanja in naknadnih posegov
3: celotni stroški za načrtovano zanesljivost

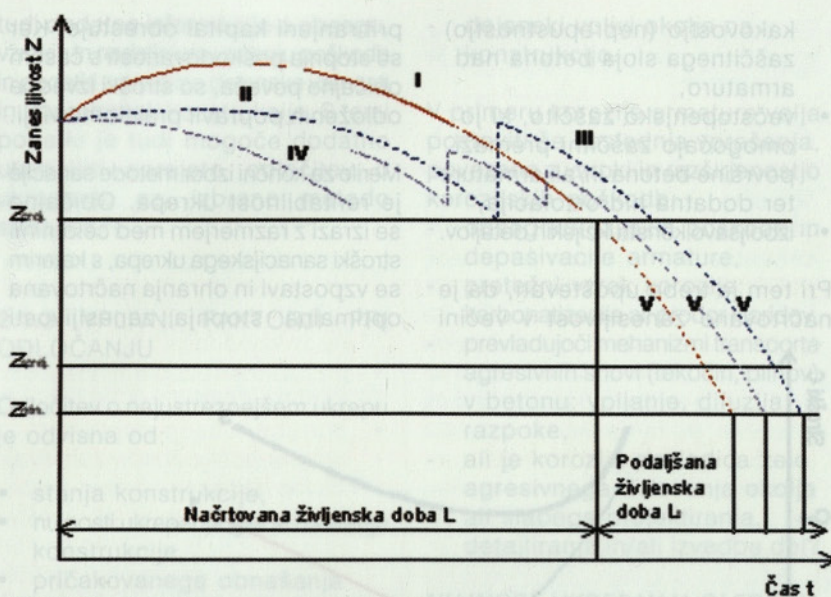
primerov možno ohranjati na dva načina (slika 2):

- a) s temeljito in vseobsegajočo sanacijo, ki v preostali življenjski dobi ne bo zahtevala večjih vzdrževalnih ukrepov in kasnejših dodatnih posegov, (II)
- b) z več enostavnejšimi posegi, ki bodo zahtevali redne vzdrževalne ukrepe in kasnejše dodatne posege, (IV).

V prvem primeru so stroški prvega popravila razmeroma visoki in zahtevajo takojšnje angažiranje večjih sredstev, kasnejši stroški vzdrževanja in kasnejših posegov pa so predvidoma nizki. V drugem primeru so stroški popravila razmeroma nizki, kar omogoča pri omejenih proračunskih sredstvih finančni prihranek, ki ga je mogoče preusmeriti za druge nujne sanacije oz. se

konstrukcije, in donosom, ki ga upravljalca prinaša opravljena sanacija. To analizo stroškov in donosa je smiselno izdelati za vsak realno izvedljiv sanacijski ukrep, katerega celotni stroški so blizu optimalni vrednosti, ugotovljeni z optimizacijsko analizo. Najugodnejša je tista varianta sanacije, s katero se zahtevana optimalna zanesljivost konstrukcije ponovno doseže in nato ohranja do konca predvidene življenjske dobe z najnižjimi celotnimi stroški ob največjem donosu.

Ker se zanesljivost in natančnost razpoložljivih podatkov za izračun stroškov in analizo rentabilnosti s časom spreminjata, je koristno podatkovno bazo o stanju konstrukcije dopolnjevati in ažurirati s podatki rednih pregledov in morebitnega opazovanja konstrukcije. Analiza



Slika 2. Shematski prikaz trajnosti in življenjske dobe armiranobetonskih konstrukcij

I - kakovostno projektirana, zgrajena in vzdrževana konstrukcija, ki do konca projektirane življenjske dobe ne zahteva nobenih večjih sanacijskih posegov

II - enkrat temeljito obnovljena konstrukcija

III - po obnovi dodatno zaščitena konstrukcija

IV - večkrat obnavljana konstrukcija

V - konstrukcija se uporablja s povečanim tveganjem

rentabilnosti, izdelana z izboljšanimi vhodnimi podatki o stanju konstrukcije, omogoča bolj smotno izrabo razpoložljivih sredstev.

Pri načrtovanju sanacij na večjem številu podobnih objektov z enako funkcijo, n.pr. mostov na določenem območju, se na podlagi kazalcev rentabilnosti določa tudi prednostni vrstni red saniranja posameznih objektov.

2.2 Strategija 1. ravni pri poškodbah zaradi korozije armature

2.2.1 SPLOŠNO

Korozija armature se začne, ko se razgradi pasivna zaščita jekla zaradi a) karbonatizacije betona, tj. zaradi znižanja alkalnosti betona okoli armature na $\text{pH} < 9,5$, in/ali b) delovanja kloridov, ki prodirajo iz okolja skozi zaščitno plast betona, ali pa jih vsebujejo osnovni

materiali.

Pri koroziji armature potekajo trije med seboj povezani elektrokemijski procesi:

- anodni proces, na depasiviranih mestih, kjer se jeklo odtaplja in prehaja v enega od Fe-oksidov (rjo),
- katodni proces, kjer se ob armaturi vežeta kisik in voda in tvorita negativno nabite hidroksilne ione, potrebne za tvorbo Fe oksidov, in
- transportni procesi, ki potekajo skozi primerno vlažen beton in omogočajo elektrolitsko povezavo med anodo in katodo.

Zaradi povečane prostornine korozijskih produktov (Fe-oksidov) nastanejo v zaščitnem sloju betona razpoke nad korodiranimi armaturnimi palicami, kar je začetna oblika razpadanja betona v primeru korozije armature. Pri delovanju soli za taljenje na bazi kloridov pa je spremljevalni

vzrok razpadanja betona njegovo izmenično zmrzovanje in odtaljevanje.

2.2.2 MOŽNI UKREPI

Na konstrukcijah z vidnimi poškodbami zaradi korozije armature, so v smislu tč. 2.1.2 na 1. ravni odločanja možni naslednji konkretni ukrepi:

- 1) zamenjava ali delna prenova poškodovanih delov konstrukcije,
- 2) popravilo oz. obnova prizadetih delov konstrukcije z ustavitvijo ali z upočasnitvijo korozijskega procesa,
- 3) neposeganje v korozijski proces, le lokalna popravila in opazovanje poškodb na konstrukciji,
- 4) neposeganje v korozijski proces, ampak alternativni nosilni sistem.

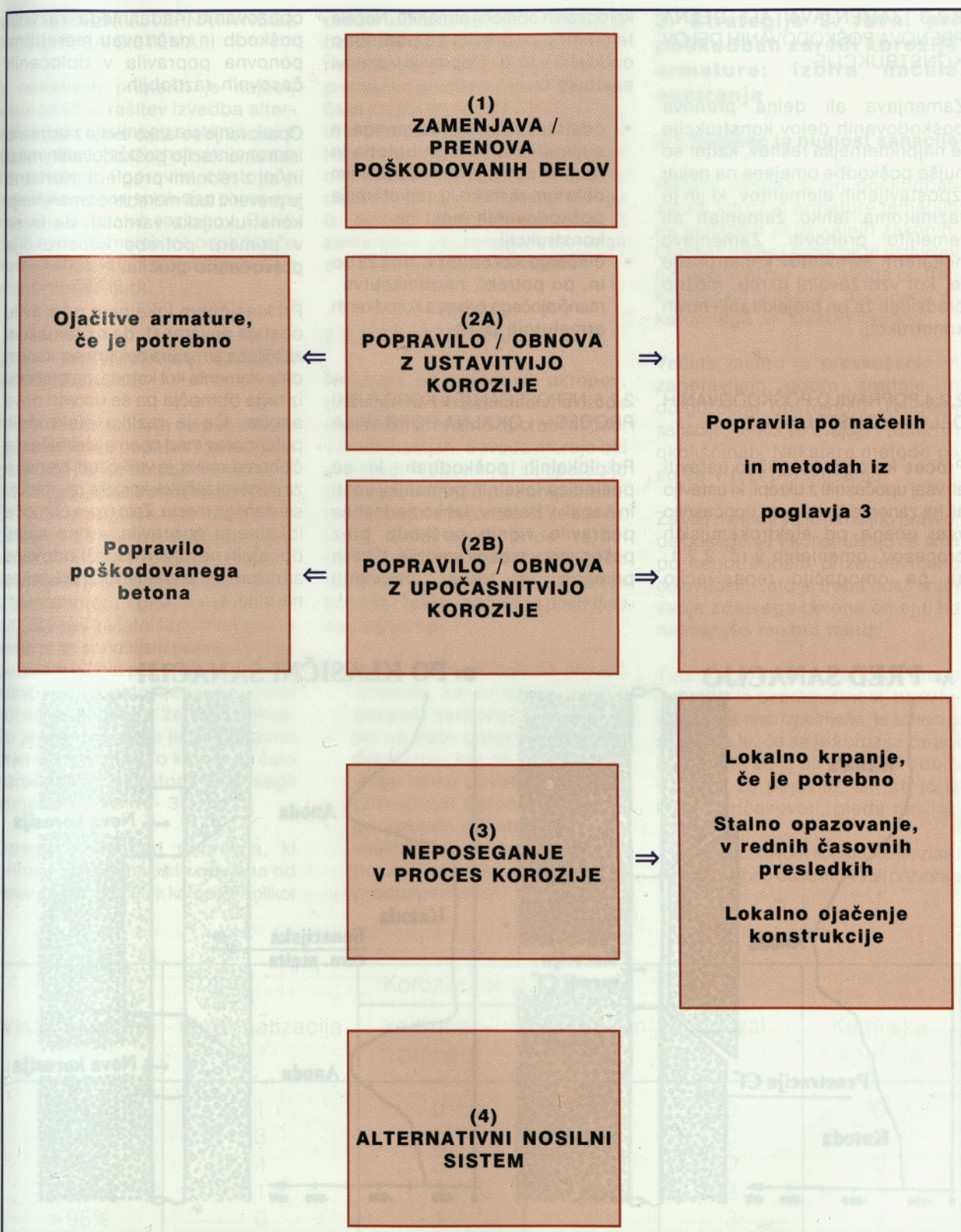
Ti ukrepi so opisani v tč. 2.2.3 do 2.2.6 in prikazani na sliki 3. Tč. 2.2.7 pa obravnava možnosti in prednosti preventivnega saniranja, ko poškodbe še niso vidne, podatki meritev (npr. električnih potencialov) pa vendar kažejo na veliko verjetnost začetka korozije armature.

Načrtovano življenjsko dobo konstrukcije, ki se sanira je mogoče ohraniti na želeni ravni zanesljivosti:

- z uporabo sanacijskih materialov, ki so dokazano odporni proti pričakovanim vplivom okolja,
- z načrtovanjem ponovnih zamenjav in/ali popravil v določenih časovnih presledkih.
- s spremembo agresivnega okolja,

Spremembo agresivnega okolja je možno doseči tako, da se

- prekine agresivno delovanje, ki je bilo vzrok poškodb (npr. ukine se soljenje cest), ali da se
- spremenijo vlažnostne razmere okoli armature, npr. z osušitvijo in/ali z dodatno zaščito betona, ali z izboljšavo konstrukcijskih detajlov, da se n.pr. prepreči zamakanje.



Slika 3. Strategije 1. ravni pri poškodbah zaradi korozije armature

2.2.3 ZAMENJAVA ALI DELNA PRENOVA POŠKODOVANIH DELOV KONSTRUKCIJE

Zamenjava ali delna prenova poškodovanih delov konstrukcije je najprimernejša rešitev, kadar so hujše poškodbe omejene na nekaj izpostavljenih elementov, ki jih je razmeroma lahko zamenjati ali temeljito prenoviti. Zamenjavo nekaterih elementov konstrukcije je, kot vzdrževalni ukrep, možno predvideti že pri projektiranju novih konstrukcij.

2.2.4 POPRAVILO POŠKODOVANIH DELOV KONSTRUKCIJE

Proces korozije je možno ustaviti ali vsaj upočasniti z ukrepi, ki ustavijo ali na zanemarljivo raven upočasnijo vsaj enega od elektrokemijskih procesov, omenjenih v tč. 2.2.1, ali pa omogočijo repasivacijo

korodiranih območij armature. Načela teh metod popravila so podrobno obdelana v tč. 3. Popravila v osnovi sestajajo iz:

- odstranitve poškodovanega in s kloridi okuženega betona in njegove zamenjave s kakovostnim betonom ali malto, tj. reprofiliranja poškodovanih mest na konstrukciji,
- čiščenja korodirane armature in, po potrebi, nadomestitve manjkajočega prereza korodiranih armaturnih palic.

2.2.5 NEPOSEGANJE V KOROZIJSKI PROCES – LOKALNA POPRAVILA

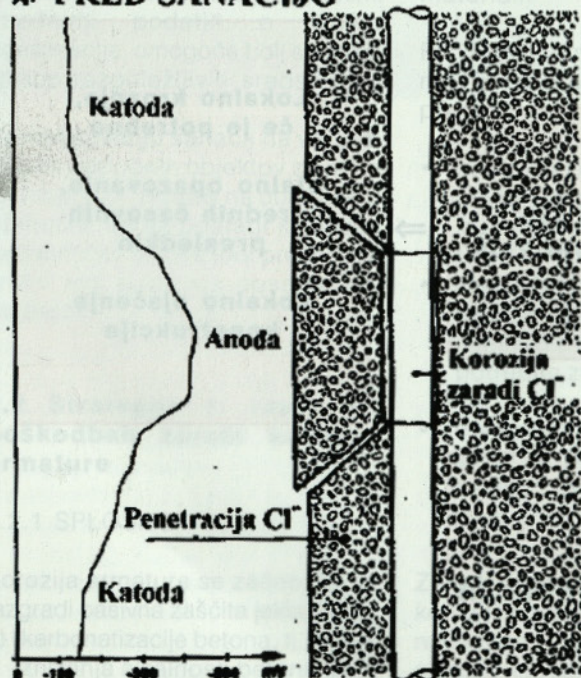
Pri lokalnih poškodbah, ki so posledica lokalnih pomanjkljivosti in napak v betonu, lahko zadostuje popravilo vidnih poškodb brez poseganja v proces korozije. V takih primerih je treba predvideti

opazovanje nadaljnega razvoja poškodb in načrtovati morebitna ponovna popravila v določenih časovnih razdobjih.

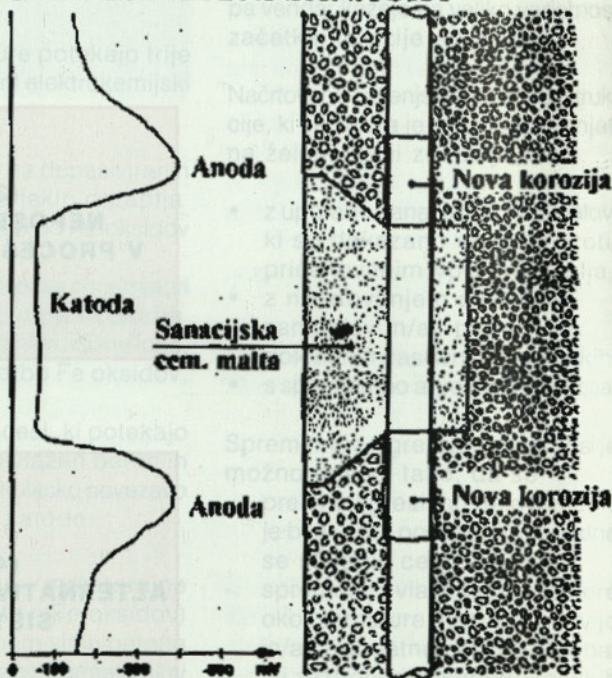
Opazovanje se lahko izvaja z ustrezno instrumentacijo poškodovanih mest in/ali z rednimi pregledi. Koristno je preveriti tudi morebitno zmanjšanje konstrukcijske varnosti, da bi se v primeru potrebe konstrukcija pravočasno ojačila.

Pri klasičnem lokalnem popravilu obstaja nevarnost, da s premazom zaščitena armatura deluje v saniranem delu elementa kot katoda, na prehodu iz tega območja pa se ustvari nova anoda. Če je razlika električnih potencialov med obema električnima členoma velika, je veliko tudi tveganje za ponovni začetek korozije na obrobju saniranega mesta. Zato mora območje lokalnega popravila vedno zajeti dodatnih nekaj cm nepoškodovane armature. To je shematično prikazano na sliki 4.

A. PRED SANACIJO



B. PO KLASIČNI SANACIJI



Slika 4. Shematični prikaz nastanka novih anod po sanaciji

2.2.6 IZVEDBA ALTERNATIVNEGA NOSILNEGA SISTEMA

V nekaterih primerih je najbolj ekonomična rešitev izvedba alternativnega nosilnega sistema, tako da se v obstoječo konstrukcijo sploh ne posega. Popravila obstoječe konstrukcije tedaj sploh niso potrebna, razen iz estetskih razlogov. Paziti pa je treba na morebitne odpadajoče kose betona, ki lahko ogrozijo varnost mimoidočih ljudi.

2.2.7 PREVENTIVNA ZAŠČITA KONSTRUKCIJE

Preventivna zaščita je cenovno lahko ugodnejša kot popravilo že nastalih poškodb, ki se običajno zelo hitro širijo in povečujejo stroške popravila. Še pomembnejše kot stroški je dejstvo, da se korozija armature, ki bi sicer vodila v razpokanje betona in zmanjšanje prereza armature, v tem primeru sploh ne pojavi ali pa ostane v začetni fazi. Preventivna zaščita ali sanacijski poseg še pred pojavom vidnih poškodb je smiselna zlasti, če je ugotovljena verjetnost korozije armature že zelo velika. To je v primerih, ko je beton ravno prav vlažen in če so kloridi ali čelo karbonatizacije betona že dosegli armaturo. (glej tč- 3.1)

Obseg in metoda popravila, ki prihajata v poštev, sta odvisna od nevarnosti za začetek korozije. Kolikor

prodor kloridov ali karbonatizacija betona še ne pomenita neposredne nevarnosti, je možno s primernim premazom površine betona za nekaj časa preprečiti nadaljnji dostop CO_2 in kloridov, s tem pa tudi odložiti korozijo armature. Če pa je pretežni del konstrukcije s kloridi že močno okužen, je bolj smiselno kloride iz betona čimprej odstraniti z zamenjavo okuženega betona ali z elektrokemijskimi metodami.

2.2.7 KOMBINIRANJE METOD

Nekatere od navedenih ukrepov, zlasti pa na njih zasnovane metode saniranja, je možno uporabljati tudi v kombinacijah. Seveda morajo biti proizvodi in sistemi, ki se uporabijo za izvedbo sanacije, kompatibilni med seboj in z betonom, ki se sanira. Kljub temu lahko pride zaradi medsebojnih neugodnih vplivov do neželenih učinkov za nastanek korozije. Takšne neželene posledice nastopijo npr.:

- če se vlažnost betona preveč zmanjša, ker to lahko kasneje pospeši karbonatizacijo,
- pri uporabi paroneprepustnih premazov, ker se zaradi ujete vlage lahko poveča električna prevodnost betona,
- pri uporabi nekaterih elektrokemijskih metod, ker lahko povzročijo krhkost jekla za prednapenjanje.

3. Strategije 2. ravni pri poškodbah zaradi korozije armature: izbira načela saniranja

3.1 Splošno in nujnost sanacije

Načela saniranja pri poškodbah zaradi korozije armature temeljijo na kemičnih in fizikalnih zakonih. Osnovni namen sanacije je ustavitev oz. upočasnitev vsaj enega od treh korozijskih procesov, anodnega ali katodnega ali elektrolitskega.

Večina metod je preskušanih in zagotavljajo dobro srednje in dolgoročno obstojnost izvedene sanacije, kolikor se izvajajo v ustreznih okoliščinah. Nekatere metode pa so še v fazi preskušanja.

Za vse metode velja temeljno pravilo, da poseganje v konstrukcijo ne sme po nepotrebnem prizadeti njene celovitosti. Zato je treba odstranjevanje zdravega betona omejiti na najmanjšo možno mero.

Tudi, če projektne zahteve glede debeline in neprepustnosti prekrivnega sloja niso izpolnjene, je sanacija smiselna le, če se je korozija zaradi karbonatizacije ali zaradi prodora kloridov že pojavila, ali, če jo je kmalu pričakovati, glede na:

- slabo kakovost konstrukcije, zlasti premajhno debelino in/ali preveliko

Vlažnost zraka	Karbonatizacija	Korozija jekla v betonu		Zmrzal	Kemijska agresija
		karbonatiziranem	okuženem s Cl		
<45%	1	0	0	0	0
45-65%	3	1	1	0	0
65-85%	4	3	3	0	0
85-95%	1	2	3	2	1
>95%	0	1	1	3	3

Preglednica 1. Vpliv vlažnosti na hitrost različnih procesov razpadanja betona (0-nepomemben, 1-majhen, 2-srednji, 3-velik)

prepustnost prekrivnega sloja betona,

- istočasno prisotnost karbonatizacije in kloridov,
- za potek korozije ugodno vlažnost betona, in
- druge agresivne vplive, ki istočasno delujejo na konstrukcijo.

Orientacijska verjetnost pojava karbonatizacije, korozije jekla v betonu, zmrzali in kemijske agresije, v odvisnosti od vlažnosti betona je razvidna iz Preglednice 1.

Razpok, ki niso nastale zaradi korozije armature, ni potrebno popravljati, če po izvršenem popravilu, ob upoštevanju predpisane debeline prekrivnega sloja betona nad armaturo, njihova širina pri predvideni obremenitvi ni večja od dovoljene za pričakovane pogoje okolja, v splošnem pa, če ne presega 0,3 mm.

Na isti konstrukciji ali konstruktivnem elementu ni priporočljivo uporabiti različnih načinov saniranja.

3.2 Načela popravila betona in zaščite armature

Načela za popravilo betona in zaščito

armature v primeru poškodb zaradi korozije armature so zbrana v Preglednici 2. Oznake načel in dodani angleški izrazi, ki pojasnjujejo izvor skrajšanih oznak posameznega načela, so usklajeni z ENV 1504-9.

Po teh načelih se sanirajo poškodbe zaradi korozije armature, ki so posledica:

- fizične izgube zaščitnega betonskega sloja,
- kemične izgube alkalnosti betona (karbonatizacije),
- okuženosti zaščitnega betonskega sloja s snovmi, ki povzročajo korozijo jekla (zlasti s kloridi),
- blodečih električnih tokov, če so v bližini električne instalacije.

Na načelih PI, CR in RI slonijo metode popravila kakršnih koli poškodb na betonu in dodatne zaščite betona pred agresivnimi vplivi oz. za povečanje odpornosti površine betona na agresivne vplive.

Na gornjih načelih zasnovani primeri metod saniranja so prikazani v Preglednici 3. Klasične metode so opisane še v tč. 4, elektrokemijske in druge posebne metode pa v tč. 5. Vrste, namen in učinkovitost

površinskih zaščitnih premazov betona so pregledno podani v / 2/.

4. Klasične metode saniranja poškodb zaradi korozije armature

4.1 Osnovna načela za pripravo podlage

Priprava podlage je bistveni sestavni del večine metod saniranja in prvipogoj za učinkovito in pravilno izvedbo postopkov. Opisi posameznih postopkov sanacije morajo zato vsebovati tudi podrobne zahteve za pripravo podlage.

Priprava podlage običajno sestoji iz:

1) priprave betona:

- odstranjevanja poškodovanega in okuženega betona,
- čiščenja in hrapavljenja površine pred nanašanjem premaza ali dobetoniranjem,

2) priprave armature: čiščenja površine pred nanašanjem premaza ali zalitja z malto ali betonom.

Odstranjevanje neustreznega betona

	Načelo	Definicija načela
PI	Površinska zaščita (<i>Protection against ingress</i>)	Zmanjšanje ali preprečenje prodora škodljivih snovi, n.pr. vode in drugih tekočin, pare, plinov ter kemičnih in bioloških snovi
CR	Obnova betona (<i>Concrete restoration</i>)	Obnova odstranjenega ali manjkajočega betona na betonskem elementu v projektirani obliki in dimenzijah
RP	Repasivacija (<i>Restoring passivity</i>)	Ustvarjanje kemičnih pogojev, v katerih bo površina armature ostala ali pa ponovno postala pasivna
IR	Povečanje upornosti (<i>Increasing resistivity</i>)	Povečanje električne upornosti betona in s tem ustavitev oz. upočasnitev elektrolitskega procesa
CC	Katodna kontrola (<i>Cathodic control</i>)	Ustvarjanje pogojev, v katerih proces redukcije na potencialno katodnih območjih armature ne bo mogel vzpodbuditi anodnega procesa
CP	Katodna zaščita (<i>Cathodic protection</i>)	Pomik elektrokemijskega potenciala v katodno področje in s tem ustavitev oz. upočasnitev katodnega procesa
CA	Anodna kontrola (<i>Control of anodic areas</i>)	Ustvarjanje pogojev, v katerih potencialno anodna območja armature ne bodo mogla sodelovati v korozijski reakciji odtapljanja jekla

Preglednica 2. Načela saniranja pri poškodbah korozije armature /4/

Načelo saniranja			Primeri metod saniranja	
Oznaka	Naziv	Vpliv*	Oznaka	Opis metode
PI	Površinska zaščita		PI-1	Impregnacija
			PI-2	Površinski premaz z ali brez sposobnosti premostitve razpok
			PI-3	Zapolnitev razpok
CR	Obnova betona		CR-1	Ročno nanašanje reparaturne malte
			CR-2	Zapolnitev z običajnim betonom
			CR-3	Zapolnitev z brizganim betonom
RP	Repasivacija betona	CO ₂	RP-2	Povečanje debeline zaščitnega sloja betona nad armaturo s slojem malte ali betona
		CO ₂ Cl	RP-2	Zamenjava karbonatiziranega in/ali s kloridi okuženega betona, ¹⁾
		CO ₂	RP-3	Elektrokemična realkalizacija karbonatiziranega betona ³⁾
		CO ₂	RP-4	Realkalizacija karbonatiziranega betona z difuzijo
		Cl	RP-5	Elektrokemična ekstrakcija kloridov
IR ²⁾	Povečanje električne upornosti betona	CO ₂ Cl	IR	Omejitev vsebnosti vlage v betonu s površinskimi obdelavami, premazi ali zaščitnim prekrivnim slojem
CC	Katodna kontrola	Cl		Omejitev vsebnosti kisika v območju katode ³⁾
			CC-1 CC-2	- z nasičenjem betona ali - s površinskim premazom
CP	Katodna zaščita	Cl	CP-1	Vzpostavitev vsiljenega tokokroga v obratni smeri, kot pri procesu korozije
			CP-2	Namestitev "žrtvene" elektrode; armatura se potem obnaša kot katoda in se ne oddaljuje
CA	Anodna kontrola	CO ₂ Cl	CA-1	Zaščita armature s premazi, ki vsebujejo aktivne pigmente
			CA-2	Zaščita armature z izolacijskimi organskimi premazi
			CA-3	Uporaba inhibitorjev ³⁾ a) kot pobrizg ali premaz betona b) kot dodatek reparaturni malti

*) Pretežni povzročitelj korozije: karbonatizacija (CO₂) ali prodor kloridov (Cl)

1) Pri načrtovani repasivaciji se armatura ne sme istočasno zaščititi s premazom, ker bi ta lahko oviral proces repasivacije.

2) To načelo se pogosto označuje z W,

3) Metode se ne smatrajo kot osnovne metode sanacije, ker so še v razvoju

mora biti selektivno, ne sme ustvarjati v ohranjenem betonu poškodb, zlasti razpok, in mora zagotavljati sprijemnost med starim in novim betonom. V tem se metode takšnega odstranjevanja tudi razlikujejo od preprostih rušitvenih postopkov. Glede na potrebno globino je odstranjevanje lahko le površinsko, zajame ves zaščitni sloj, ali seže za območje armature, oziroma celo v večjo globino.

Za odstranjevanje poškodovanega oz. okuženega betona veljajo naslednja splošna načela:

- odstranjevanje zdravega betona, ki je dokazano dobre kakovosti, je načelno nesprejemljivo in tudi škodljivo; odstraniti je treba le prek dopustne meje okuženi ali drugače neustrežni oz. propadli beton; beton, ki preverjeno opravlja svojo funkcijo zaščite armature in je del nosilnega prereza, ima vedno prednost pred novim betonom, katerega končne lastnosti se lahko le predpostavijo;
- odvečno odstranjevanje nič ne prispeva h končni kakovosti popravila; poveča pa stroške odstranjevanja in stroške ponovne nadomestitve betona (reprofiliranja);
- med odstranjevanjem betona ne sme biti prizadeta celovitost in ogrožena varnost konstrukcije;
- obseg odstranjevanja mora biti usklajen z uporabljenim načelom saniranja, odvisen pa je od:
 - kakovosti betona, predvsem glede njegove prepustnosti za pline in tekočine,
 - ugotovljene globine karbonatizacije,
 - profila prodiranja kloridov, tj. od ugotovljenih vsebnosti na različnih globinah pod površino, zlasti od izmerjenih vrednosti v globini armature,
 - korozijske aktivnosti armature,
 - zahtevane debeline novega zaščitnega sloja nad armaturo, glede na predvideno stopnjo agresivnosti okolja,
 - morebitne obdelave armature (čiščenje in premaz);

• obseg odstranjevanja je treba določiti z ustreznimi, sistematično izvedenimi in po celotni prizadeti ali sumljivi površini razporejenimi preiskavami, ki omogočajo zanesljivo identifikacijo neustreznega betona; temu namenu lahko služijo:

- podroben vizualni pregled,
- pretrkavanje površine,
- meritve globine karbonatizacije in globine prodora kloridov,
- meritve električnih potencialov.

Pri zamenjavah poškodovanega betona je treba beton okoli armature odstraniti najmanj 2 cm za armaturne palice, če je:

- korodiranega več kot 30% oboda odkrite armaturne palice,
- vsebnost kloridov v ravnini armature večja od kritične vrednosti, določene za konkretni primer (tč. 4.3.2).

Zelo učinkovit način odstranjevanja betona je z vodnim curkom pod pritiskom 700 do 1200 barov, (*hydrodemolition*). Elektronsko vodena naprava z ustrezno nastavitvijo hitrosti količine in pritiska vode ter hitrosti in načina premikanja stroja omogoča nadzorovano globino odstranjevanja in selekcijo kakovostnega zdravega betona od betona nižje kakovosti. V ohranjenem betonu ne povzroča mikrorazpok, vgrajeno armaturo pa dovolj temeljito očisti rje in jo pri tem ne poškoduje. Nastavitve stroja je treba vedno prilagajati predhodno ugotovljenemu stanju betona na posameznih območjih konstrukcije, ki se sanirajo. Enotna nastavev glede na najslabše stanje, bi bila zlasti na elementih z veliko površino (npr. večjih mostnih ploščah) zaradi odvečnega obsega in stroškov odstranjevanja nesmiselna.

4.2. Metode saniranja v primeru karbonatizacije betona

4.2.1. SPLOŠNO

Opisane metode saniranja se smejo

uporabljati le, če je korozija nastala izključno zaradi karbonatizacije betona, v katerem je vsebnost kloridov občutno pod kritično mejo, določeno za konkretne razmere.

4. Klasične metode saniranja

Nekatere metode, ki temeljijo na sanacijskih načelih, podanih v Preglednici 2, so prikazane na sliki 5 in kratko opisane v tč. 4.2.2 do 4.2.6. Slikovni prikaz vsake metode vsebuje tudi bistvene zahteve za potrebno globino odstranitve betona, površinsko obdelavo armature, alkalnost sanacijske malte oz. betona in dodatno obdelavo (premaz) površine betona.

Nekatere izmed metod so bile uspešno uporabljene v mnogih državah (npr. RP-2 in CA-2), nekatere le redko (npr. RP-1), nekatere pa so še v fazi preskušanja (npr. RP-3 in IR).

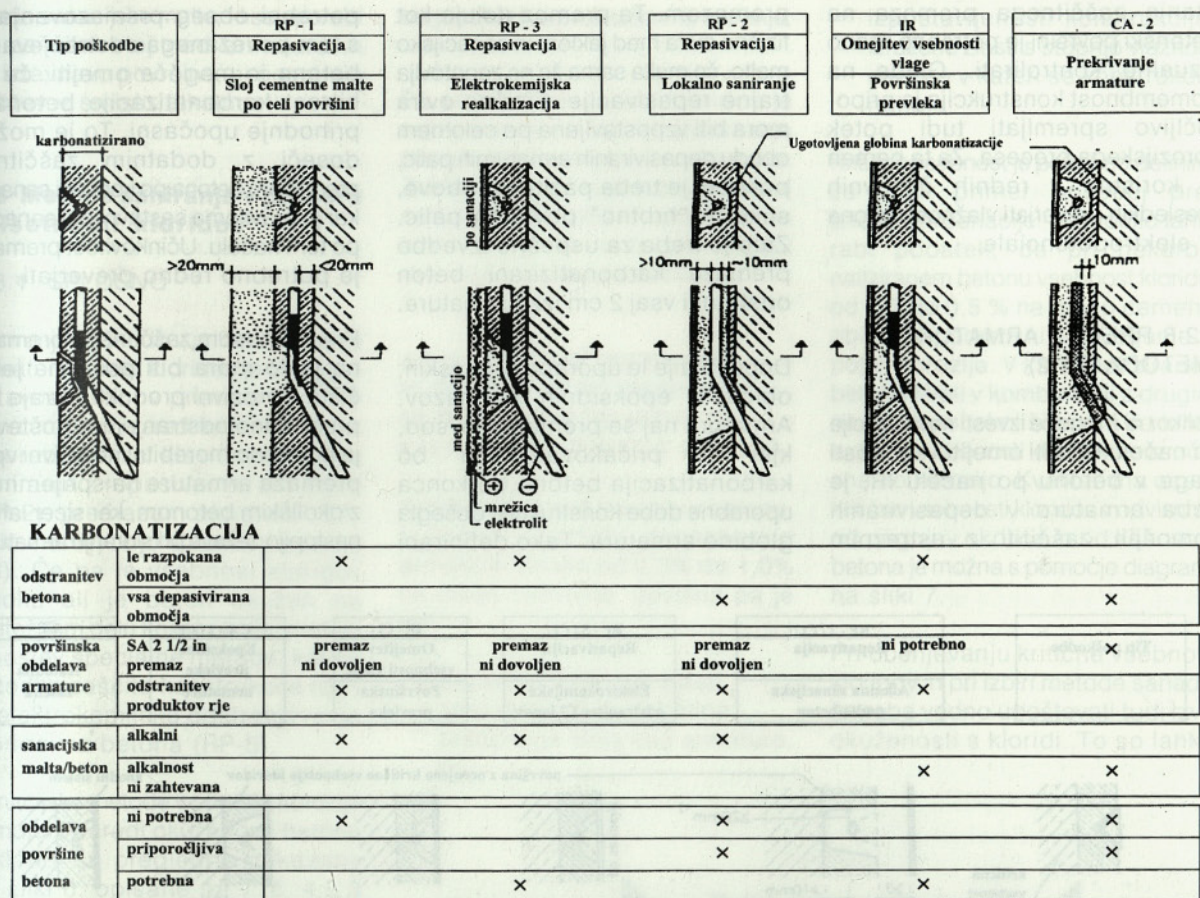
4.2.2. REPASIVACIJA Z ALKALNIM BETONOM ALI MALTO (METODA RP-1)

Ta metoda je zasnovana na nanosu plasti cementne malte ali cementnega betona po celotni betonski površini, kar omogoči realkalizacijo karbonatizirane plasti betona in s tem tudi repasivacijo armature. Pogoji za uspešno realkalizacijo je pospešena difuzija hidroksilnih ionov iz novo nanesenega betona ali malte pri izmeničnem močenju in sušenju. Čas, ki je potreben za to spremembo, je nekaj mesecev.

Ta metoda je bila že mnogokrat uspešno uporabljena. Pred nanašanjem sveže malte ali betona je potrebno na razkritih delih armaturo očistiti, ne sme pa se je premazati, saj bi premaz onemogočil repasivacijo.

4.2.3. REPASIVACIJA S SANIRNO MALTO/BETONOM NA LOKALNO OMEJENIH OBMOČJIH (METODA RP-2)

Če se je korozija pojavila le na lokalnih



Slika 5. Metode saniranja v primeru karbonatizacije betona /3/

območjih, zadošča saniranje samo teh lokalnih območij. Ker realkalizacija s hidroksilnimi ioni ni zagotovljena po vsej površini, je potrebno odstraniti ves karbonatizirani beton, ki je v stiku z armaturo, četudi se korozija še ni pojavila. Po sanaciji je treba betonsko površino premazati še z zaščitnim premazom, ki izboljša odpornost betona proti ponovni karbonatizaciji.

4.2.4. REPASIVACIJA Z ELEKTROKEMIJSKO REALKALIZACIJO (METODA RP-3)

To je elektrokemijska metoda, ki je kratko opisana v poglavju 5.4.

4.2.5. OMEJITEV VSEBNOSTI VLAGE V BETONU (METODA IR)

Ta metoda temelji na spremembi okolja, v katerem se nahaja beton. S primerno obdelavo površine betona, ki onemogoči navzemanje vlage iz okolice, se vlažno "zunanje" okolje spremeni v bolj suho "notranje" okolje. Za ta namen je primerna npr. hidrofbna impregnacija, pri čemer pa je potrebno zagotoviti, da vlaga ne more penetrirati v beton od drugod, npr. iz tal s kapilarnim vlekrom. Enako kot hidrofbna zaščita učinkuje tudi neprepusten premaz, ki pa se nanaša na osušeno površino betona.

Zaenkrat je o dolgoročnih rezultatih

te metode še malo podatkov, zlasti o povezavi med načinom obdelave površine betona in hitrostjo korozije armature v tem betonu. Na voljo pa so podatki o laboratorijskih preskusih, ki kažejo, da se hitrost korozije v karbonatiziranem betonu zelo upočasni, če se zmanjša vsebnost vlage.

Odstranjevanje betona je potrebno le na območjih, kjer je korozija že povzročila razpoke in luščenje. To pomeni, da armatura, ki je sicer korodirala, ni pa povzročila razpok in luščenja betona, ostane nedotaknjena. Premaz armature na mestih, kjer se je beton odstranil, ni potreben, saj to načelo temelji na preprečevanju elektrolitskega procesa.

Stanje zaščitnega premaza na betonski površini je potrebno redno vizualno kontrolirati. Glede na pomembnost konstrukcije je priporočljivo spremljati tudi potek korozijskega procesa. Za ta namen je koristno v rednih časovnih presledkih preverjati vlažnost betona in elektropotenciale.

4.2.6 PREMAZ ARMATURE (METODA CA-2)

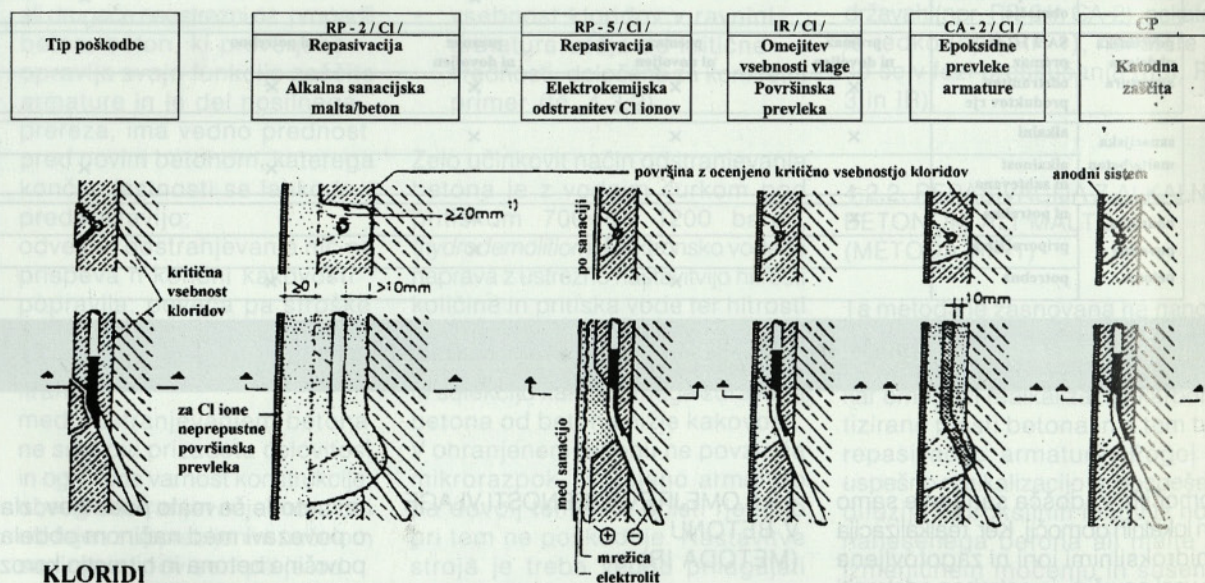
Kolikor ni mogoče izvesti repasivacije po načelu RP niti omejiti vsebnosti vlage v betonu po načelu IR, je treba armaturo v depasiviranih območjih zaščititi z ustreznim

premazom. Ta premaz deluje kot fizična ovira med jeklom in sanacijsko malto, če malta sama že ne zagotavlja trajne repasivacije. Fizična ovira mora biti vzpostavljena po celotnem obodu depasiviranih armaturnih palic, posebej je treba paziti na robove, stike in "hrbtno" površino palic. Zato je treba za uspešno izvedbo premaza karbonatizirani beton odstraniti vsaj 2 cm izza armature.

Dopustna je le uporaba organskih, običajno epoksidnih premazov. Armatura naj se premaže povsod, kjer je pričakovati, da bo karbonatizacija betona do konca uporabne dobe konstrukcije dosegla globino armature. Tako definirani

potrebni obseg premazovanja in s tem povezanega odstranjevanja betona je mogoče omejiti, če se hitrost karbonatizacije betona v prihodnje upočasni. To je možno doseči z dodatnim zaščitnim premazom betona po končani sanaciji, kar je praviloma sestavni del sanacije po tem načelu. Učinkovitost premaza je potrebno redno preverjati.

Pred nanosom zaščitnega premaza na jeklo mora biti površina jekla čista, korozivni produkti morajo biti predhodno odstranjeni. Upoštevanje je potrebno morebitni negativni vpliv premaza armature na sprijemnost z okoliškim betonom, ker sicer lahko nastopijo težave pri sidranju armature.



KLORIDI

odstranitev betona	le razpokana območja		×	×	×
	vsa depasivirana območja	×			×
površinska obdelava armature	SA 2 1/2 in premaz	premaz ni dovoljen	premaz ni dovoljen	ni potrebno	×
	odstranitev vseh produktov rje	×	×	×	×
sanacijska malta/beton	alkalni	×	×		×
	alkalnost ni zahtevana			×	×
obdelava površine betona	ni potrebna				×
	potrebna, nepre- pusna za Cl ⁻ ione	×	×	×	×

Slika 6. Metode saniranja v primeru prisotnosti kloridov /3/

Glede sanacijske malte, ki se uporabi za zaščitni sloj nad armaturo in za izravnavo površine, ni posebnih zahtev v smislu alkalnosti.

4.3 Metode saniranja v primeru prisotnosti kloridov

4.3.1. SPLOŠNO

Saniranje poškodb v primeru korozije armature zaradi kloridov je bistveno težavnejše kot v primeru korozije armature samo zaradi karbonatizacije. Uporabljajo se klasične metode saniranja z repasivacijo armature (RP-2), premazom armature (CA-2) in z omejitvijo vlažnosti betona (IR). Če pa je vsebnost kloridov visoka ali je beton okužen na pretežnem delu konstrukcije, pridejo v poštev specialne metode, kot so katodna zaščita konstrukcije (CP) in elektrokemijsko odstranjevanje kloridov iz betona (RP-5).

Sanacijske metode v primeru korozije armature zaradi okuženosti betona s kloridi so pregledno prikazane na sliki 6, opisane pa v tč. 4.3.3 do 4.3.6. Metode repasivacije RP-1 v smislu tč. 4.2.2 pa v primeru prodora kloridov ni mogoče uporabiti.

Na odločitev o najustreznejši metodi in potrebnem obsegu saniranja vplivata ugotovljena vsebnost kloridov po globini prereza na obravnavanem mestu konstrukcije in kritična vsebnost kloridov, ki v določenih okoliščinah lahko povzroči depasivacijo armature.

Čiščenju korodirane armature je potrebno posvetiti posebno pozornost. Ker korozijski produkti vsebujejo velike količine kloridov, jih je potrebno odstraniti v celoti, kar se običajno izvede z mokrim in suhim peskanjem.

Pri metodah RP-2, RP-5, CA-2 in IR je po izvedeni sanaciji predviden dodaten premaz betonske površine, da se novim kloridom prepreči dostop v beton. Uporabljeni premaz mora

biti predhodno preskušen na staranje.

Pri poškodbah zaradi kloridov je zelo pomembno stalno opazovanje (*monitoring*) sanirane konstrukcije. Zaščitni premaz, ki ga je po opravljeni sanaciji priporočljivo uporabiti, pa lahko ovira ali celo onemogoči merjenje elektropotencialov.

4.3.2 KRITIČNA VSEBNOST Kloridov IN POTREBNA GLOBINA ODSTRANITVE S Kloridi OKUŽENEGA BETONA

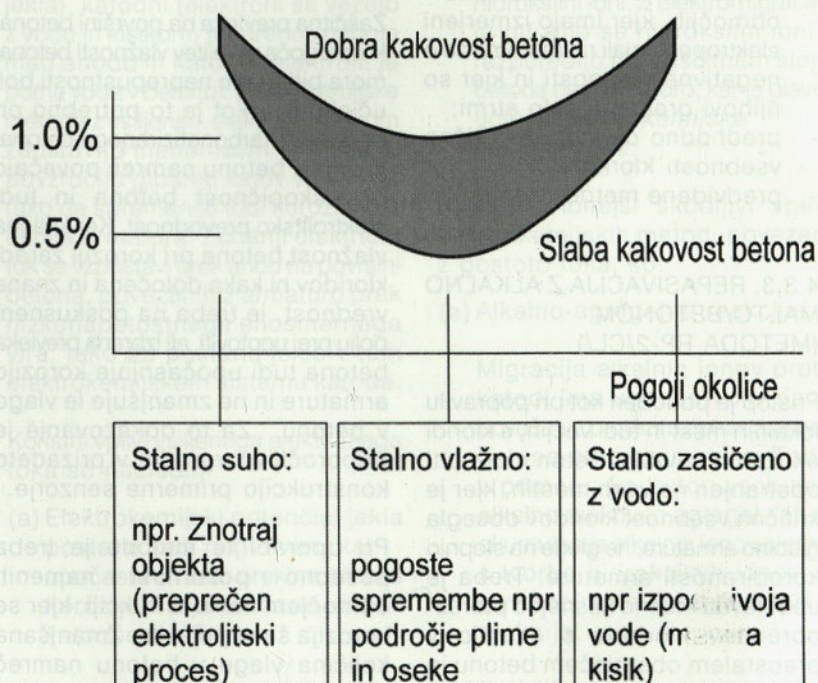
Kritična vsebnost kloridov v betonu, ki lahko povzroči depasivacijo armature, znaša od 0,3% do 1,0% na maso cementa, odvisna pa je od:

- kakovosti betona, zlasti prepustnosti in debeline zaščitnega sloja nad armaturo, in

- izpostavljenosti konstrukcije, izražene zlasti s stopnjo vlažnosti okolice v kateri se konstrukcija nahaja.

Kritično vsebnost je potrebno definirati za vsak primer posebej pred pričetkom sanacije. Kot vodilo lahko rabi podatek, da pri nekarbonatiziranem betonu vsebnost kloridov od 0,3 do 0,5 % na maso cementa običajno pomeni nizko tveganje za pojav korozije. V karbonatiziranem betonu in/ali v kombinaciji z drugimi neugodnimi okoliščinami pa lahko tudi nižje vsebnosti kloridov povzročijo znatno korozijo. Kvalitativna ocena kritične vsebnosti kloridov v odvisnosti od pogojev okolice in od kakovosti betona je možna s pomočjo diagrama na sliki 7.

Pri ocenjevanju kritične vsebnosti kloridov in pri izbiri metode sanacije je treba vedno upoštevati tudi izvor okuženosti s kloridi. To so lahko:



Slika 7. Kvalitativna odvisnost kritične količine kloridov od pogojev vlažnosti okolice in kakovosti zaščitnega sloja betona

- s kloridi nasičena okolica, npr. morska voda ali obmorski zrak,
- posamezni dogodki, npr. posipanje cestišča s solmi za taljenje,
- sestavine betona, npr. agregat, kemijski dodatki; v tem primeru se ne sme uporabiti sanacijskih metod RP-2, RP-5 in CP.

Potrebno globino in obseg odstranjevanja okuženega betona na obravnavani konstrukciji je treba določiti na podlagi podrobnega pregleda konstrukcije, kombiniranega z meritvami vsebnosti kloridov v več globinah pod površino betona, na smiselno razporejenih mestih konstrukcije in po potrebi z meritvami elektropotencialov. Globina in obseg odstranjevanja sta potem odvisna od:

- prostorske porazdelitve koncentracij kloridov v notranjosti konstrukcije;
- verjetnosti obstoja korozije armature pod zunaj še nepoškodovano površino; verjetnost je velika zlasti na območjih, kjer imajo izmerjeni elektropotenciali razmeroma zelo negativne vrednosti in kjer so njihovi gradienti zelo strmi;
- predhodno definirane kritične vsebnosti kloridov;
- predvidene metode saniranja.

4.3.3. REPASIVACIJA Z ALKALNO MALTO/BETONOM (METODA RP-2/CL/)

Pristop je podoben kot pri popravilu lokalnih mest in tudi večjih, s kloridi okuženih površin. Beton mora biti odstranjen na vseh mestih, kjer je kritična vsebnost kloridov dosegla globino armature, ne glede na stopnjo korodiranosti armature. Treba je upoštevati možno kasnejšo prerazporeditev kloridov z difuzijo v preostalem obstoječem betonu in v sanacijski malto oz. betonu. Beton je treba odstraniti v takem obsegu, da med nadaljnjo uporabo konstrukcije kritična vsebnost kloridov zagotovo ne bo več dosegla armature.

Za čiščenje armature je treba uporabiti sredstvo, s katerim je možno očistiti tudi korozijske jamice.

Z ustrezno sestavo in debelino nanosa sanacijske malte/betona je treba preprečiti morebitni ponovni prodor kloridov in ponovno depasivacijo armature. Kolikor se tudi v bodoče ni mogoče izogniti izpostavljenosti kloridom, je koristno prodor kloridov iz okolice v novi, sanacijski beton vnaprej onemogočiti z nanosom za kloride neprepustnega premaza ali sloja malte na površino betona.

4.3.4. REPASIVACIJA Z ELEKTROKEMIJSKO ODSTRANITVIJO KLORIDOV (SANACIJSKO NAČELO IN METODA RP-5/CL/)

To je elektrokemijska metoda, ki je kratko opisana je v tč.5.3.

4.3.5. OMEJITEV VSEBNOSTI VLAGE V BETONU (METODA IR/CL/)

Zaščitna prevleka na površini betona, ki omogoča omejitev vlažnosti betona, mora biti glede neprepustnosti bolj učinkovita, kot je to potrebno pri popravilih karbonatiziranega betona. Kloridi v betonu namreč povečajo higroskopičnost betona in tudi elektrolitsko prevodnost. Ker kritična vlažnost betona pri koroziji zaradi kloridov ni kaka določena in znana vrednost, je treba na poskusnem polju prej ugotoviti, ali izbrana prevleka betona tudi upočasnjuje korozijo armature in ne zmanjšuje le vlago v betonu. Za to dokazovanje je priporočljivo vgraditi v prizadeto konstrukcijo primerne senzorje.

Pri uporabi te metode je treba posebno pozornost nameniti območjem na konstrukciji, kjer se korozija še ni pojavila. Zmanjšana količina vlage v betonu namreč omogoča dostop kisika na površino armature in je na ta način izpolnjen eden od pogojev za začetek oz. nadaljevanje korozijskega procesa. Če so rezultati poskusnega polja

ugodni, je potrebno pri izvedbi sanacije beton odstraniti le na območjih, kjer je korozija armature že povzročila razpoke in luščenje betona. To pomeni, da lahko vsa korodirana armatura, ki še ni povzročila poškodb, ostane nesaniirana. Za odstranjevanje rje s površine armature se priporoča vodni curek pod visokim tlakom.

Glede alkalnosti sanacijske malte ni nobenih posebnih zahtev.

Če se pričakuje, da bo konstrukcija tudi v bodoče izpostavljena kloridom, mora biti prevleka betonske površine neprepustna in odporna proti kloridom.

4.3.6. PREMAZ ARMATURE (METODA CA-2/CL/)

Če ni mogoče uporabiti metod RP, IR ali CP, torej če ni mogoče zagotoviti repasivacije s sanacijsko malto ali zmanjšanja vsebnosti vlage, ali če ni mogoče izvesti katodne zaščite, je treba armaturo zaščititi s premazom na vseh mestih, kjer je bila med sanacijo razkrita. Premaz potem deluje kot fizična prepreka med armaturo in sanacijsko malto, če malta sama ne zagotavlja trajne repasivacije. Za ta namen se smejo uporabljati le organski, prednostno epoksidni, premazi.

Metoda zahteva odstranjevanje betona na vseh tistih mestih, kjer bi med preostalo življenjsko dobo objekta kritična vsebnost kloridov lahko dosegla armaturo. Pri določanju obsega odstranitve betona je treba upoštevati tudi možno prerazporeditev kloridov po sanaciji in nevarnost nastanka novih anod, zlasti če je prehod od saniranega na nesaniirani del betona nezvezen (glej tč. 2.2.5).

Površino jekla je treba očistiti produktov korozije na stopnjo SA 2 1/2. Fizična prepreka (premaz) mora biti učinkovita na celotni obdelani površini jekla. Posebna pazljivost je zato potrebna v vogalih konstrukcije, na preklonih, in na zadnji, "hrbtini"

površini palic. Bistveno pri tem je, da se produkti korozije popolnoma odstranijo s površine armature. Edina možna načina za doseganje primerne čistoče armature sta visokotlačni vodni curek in peskanje. Upoštevati je potrebno morebitni negativni vpliv premaza armature na sprijemnost z okoliškim betonom, kar lahko povzroči težave pri sidranju.

Za sanacijsko malto, ki se uporabi za zaščitni sloj nad armaturo in za izravnavo površine, v tem primeru ni posebnih zahtev v smislu alkalnosti.

Če je konstrukcija še naprej izpostavljena delovanju kloridov, je koristno izvesti na betonski površini zaščitno prevleko, neprepustno za kloride.

5. Elektrokemijske metode zaščite

5.1 Splošno

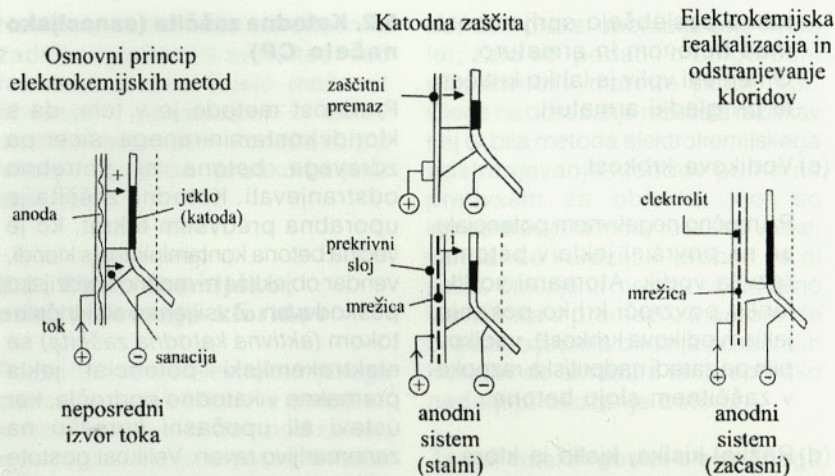
Klasične metode popravila poškodb zaradi korozije armature iz tč. 4 so uporabne predvsem pri lokaliziranih korozijskih žariščih, njihova učinkovitost in primernost pa postaneta vprašljivi pri večjem obsegu poškodb oziroma splošni kontaminiranosti betona. V takem primeru postane cena popravil po klasičnih postopkih visoka, še posebej, če je med sanacijo potrebna začasna ojačitev objekta. Zato v razvitih državah poteka intenziven razvoj alternativnih metod sanacije in protikorozijske zaščite, ki večinoma temeljijo na elektrokemijskem načelu zaščite.

Elektrokemijske metode zaščite so:

- katodna zaščita,
- elektrokemijsko odstranjevanje kloridov,
- elektrokemijska realkalizacija.

Med alternativne metode protikorozijske zaščite spada tudi uporaba inhibitorjev korozije.

Načela delovanja elektrokemijskih metod in njihove osnovne značilnosti



Slika 8. Elektrokemijske metode saniranja in zaščite betonskih konstrukcij

so prikazane na sliki 8.

Vse tri metode delujejo na istem elektrokemijskem principu oziroma izkoriščajo elektrokemijski mehanizem korozijskega procesa. V tč. 2.2.1 je bilo pojasnjeno, da korozijo armature omogočajo trije med seboj povezani procesi: anodni (odtapljanje jekla), katodni (elektroni se vežejo z vodo in kisikom) ter prenos naboja med anodo in katodo (elektrolit je pora voda v betonu). Elektrokemijske metode z vsiljenim električnim tokom zaustavijo mehanizem korozije in povzročijo gibanje ionov v betonu, tako da spremenijo tudi korozivnost okolja armature. Zunanji električni tok se vzpostavi prek anod na površini betona, povezanih z armaturo prek nizkonapetostnega enosmernega vira, tako da postane jeklo v tem elektrokemijskem sistemu katoda.

Koristni vplivi vsiljenega električnega toka so naslednji:

- (a) Elektrokemijski potencial jekla postane bolj negativen, kar upočasni ali celo prekine proces korozije. To je primarni učinek *katodne zaščite*;
- (b) Zaradi električnega polja (elektromigracije) potujejo kloridni ioni proti anodi, oziroma stran od armature. Kolikor je anoda povezana z zunanjim elektrolitom,

se po končanem postopku sanacije kloridi odstranijo skupaj z elektrolitom. To je glavni cilj *elektrokemijskega odstranjevanja kloridov*.

- (c) Z elektrokemijsko reakcijo, ki znižuje vsebnost kisika ali vlage na stiku jekla in betona, se tvorijo hidroksilni ioni. Z elektromigracijo in difuzijo se hidroksilni ioni razporedijo po zaščitnem sloju betona nad armaturo, kar je glavni učinek *elektrokemijske realkalizacije*.

Najpomembnejši škodljivi vplivi elektrokemijskih metod, povezani z gostoto toka, so:

- (a) Alkalno-agregatna reakcija

Migracija alkalnih ionov proti katodi ima ugoden vpliv na povečanje protikorozijskih lastnosti betona okrog armature. Toda v primeru, ko beton vsebuje alkalno reaktiven agregat, lahko akumulacija alkalnih ionov skupaj s tvorbo hidroksilnih ionov povzroči alkalno-agregatno reakcijo.

- (b) Poslabšanje sprijemnosti armature in betona

Kemijske in fizikalne spremembe v betonu zaradi električnega toka

lahko poslabšajo prijemnost med betonom in armaturo.

Omenjeni vpliv je lahko kritičen le pri gladki armaturi.

(c) Vodikova krhkost

Pri močno negativnem potencialu se na površini jekla v betonu razvija vodik. Atomarni vodik lahko povzroči krhko pokanje jekla (vodikova krhkost), vodikov plin pa zaradi nadpritiska razpoke v zaščitnem sloju betona.

(d) Razvoj kisika, kislin in klora.

Na anodi se razvijajo kisik in kisline, ki znižajo pH vrednost površinske plasti betona, in lahko tudi poškodujejo beton in anodo. Pri visokih gostotah toka se na anodi Cl^- ioni pretvorijo v klor.

Kot je bilo že omenjeno, je princip delovanja enak pri vseh elektro-kemijskih metodah sanacije in protikorozijske zaščite. Glavne razlike med tremi metodami so predvsem v:

- gostoti uporabljenega toka,
- trajanju procesa,
- izvedbi anode in uporabi elektrolita.

V Preglednici 5 so zbrane njihove glavne značilnosti.

5.2. Katodna zaščita (sanacijsko načelo CP)

Prednost metode je v tem, da s kloridi kontaminiranega, sicer pa zdravega betona ni potrebno odstranjevati. Katodna zaščita je uporabna predvsem takrat, ko je večina betona kontaminirana s kloridi, vendar objekt še ni močno korozijsko poškodovan. Z vsiljenim električnim tokom (*aktivna katodna zaščita*) se elektrokemijski potencial jekla premakne v katodno področje, kar ustavi ali upočasni korozijo na zanemarljivo raven. Velikost gostote vsiljenega toka se uravnava glede na zahtevani premik potenciala (običajno 100 mV). V primeru zadostne električne prevodnosti okolice objekta (morska voda, zemljina, ipd.) se lahko namesto zunanjega električnega vira uporabijo žrtvene anode (*pasivna katodna zaščita*). Žrtvene anode so kovine, ki imajo nižji korozijski potencial od jekla: cink, magnezij.

Za pravilno delovanje sistema katodne zaščite mora biti armatura zvezno električno prevodna, zaščitni sloj betona nad armaturo pa mora omogočati stalno elektrolitsko prevodnost. Zato morajo biti razpoke betona in delaminacije pred izvedbo katodne zaščite sanirane s klasičnimi postopki. Anodni del sistema, ki sestoji iz anodnega materiala in

njegovega prekritja ter sistema za porazdelitev toka, mora zagotavljati:

- enakomerno porazdelitev toka,
- mehansko in električno trajnost,
- sprejemljivo težo glede na konstrukcijo,
- sprejemljiv videz konstrukcije.

Anodni sistemi se razvrščajo glede na geometrijo in osnovni prevodni material. Glede na geometrijo se uporabljajo naslednje vrste anod:

- anodna mreža, ki se prilega površini konstrukcije, in je prekrita s plastjo cementnega materiala, ki rabi kot elektrolit,
- prevodna plast, ki se nanese neposredno na zunanjo površino konstrukcije,
- anode v obliki žic ali trakov, nameščene v izvrtine ali zareze v betonskem elementu in zapolnjene s cementnim materialom,
- prevodne plošče, ki se namestijo na površino betona ali samo na njen del.

Glavni materiali, ki se uporabljajo za anode, so:

- materiali na osnovi oksidov žlahtnih kovin, npr. platine ali iridija, ki se nanesejo na podlago iz titanove mreže, žice ali traku,
- ogljikovi materiali kot vezivno polnilo v proizvodih za izdelavo prevodne plasti v obliki premazov ali prevlek.

Metoda	Značilna gostota toka	Trajanje procesa	Anodni in elektrolitski sistem
Katodna zaščita	$< 20 \text{ mA/m}^2$	v vsej preostali življenjski dobi konstrukcije	različni inertni materiali z življenjsko dobo 10-50 let; alkalno-cementni elektrolit
Elektrokemijsko odstranjevanje kloridov	$0.8 - 2 \text{ A/m}^2$	6 – 10 tednov	jeklena ali inertna mreža; voda ali apnena raztopina
Elektrokemijska realkalizacija	$0.5 - 1 \text{ A/m}^2$	2 – 20 dni	jeklena ali inertna mreža; raztopina natrijevega karbonata

Preglednica 5. Glavne značilnosti elektro-kemijskih metod

Zaradi možnosti lokalnega znižanja pH vrednosti morajo malte okrog anode vsebovati dovolj alkalnega materiala. Temu pogoju ustrezajo s cementom bogate malte, manj pa polimerne malte. Jeklo ne potrebuje posebne obdelave, razen odstranitve korozijskih produktov na mestih, kjer je armatura že razgaljena. Površina betona mora omogočiti dobro oprijemljivost za nanos zaščitne barve ali dodatne prekrivne plasti iz malte oz. betona.

Od vseh omenjenih negativnih vplivov električnega toka je pri normalnih pogojih delovanja katodne zaščite lahko nevarna le vodikova krhkost. Omenjeni pojav je kritičen predvsem pri visokotrdnostnih jeklih, zato se katodna zaščita praviloma ne izvaja na prednapetem betonu. Izvedba katodnega sistema mora zagotoviti čimvečjo homogenost električnega toka, saj previsoke gostote toka povzročijo dodatne negativne efekte. Za optimalno protikorozijsko zaščito in preprečevanje negativnih učinkov je potreben stalen nadzor sistema katodne zaščite in njegovo sprotno vzdrževanje.

Katodna zaščita je že postala zanesljiva in široko uporabljana metoda sanacije in protikorozijske zaščite armiranobetonskih objektov /10-11/. Uvaja se tudi pri novozgrajenih objektih, predvsem v okoljih, kjer je korozijska ogroženost velika in homogena (npr. morsko okolje). Vprašljiva še vedno ostaja relativno visoka cena, zato poteka intenziven razvoj novih anodnih materialov. Ogljikovi materiali so npr. bistveno cenejši, a manj trajni od titanove mreže.

V zadnjem obdobju se preskuša tudi katodna zaščita prednapetega betona z uporabo manjše gostote toka (od 0.5 do 2 mA/m²). Preliminarni rezultati t.i. katodne prevencije (*cathodic prevention*) so ugodni, saj kažejo, da pri teh pogojih še ni dosežen prag za vodikovo krhkost /12/. Intenzivno se preiskuje tudi kombinacija omenjene metode z različnimi premazi za armaturo.

Navkljub določenim strokovnim zadržkom poteka v svetu tudi več raziskav, ki preučujejo možnost ščitenja posameznih delov armiranobetonskih konstrukcij z lokalno izvedbo protikorozijske zaščite.

5.3. Elektrokemijsko odstranjevanje kloridov

Poglavitni namen elektrokemijskega odstranjevanja kloridov je zmanjšati koncentracijo kloridov pod raven, ki povzroča korozijo armature. Izvedba metode je podobna kot pri katodni zaščiti, le da so gostote toka pri elektrokemijskem odstranjevanju kloridov večje (od 0.8 do 2 A/m²). Zaradi vsiljenega električnega polja kloridni ioni migrirajo od armature proti anodi, ki je nameščena na površino betona. Po zmanjšanju koncentracije kloridov na dopustno raven se začasne anode in elektrolit, ki vsebuje iz betona izvlečene kloride, odstranijo.

Zahteve za uspešno izvedbo elektrokemijskega odstranjevanja kloridov so podobne kot pri katodni zaščiti: zagotoviti je treba homogenost električnega toka in je zato potrebno pred instalacijo sistema klasično sanirati razpoke in delaminacije. Anoda je mreža iz inertnega materiala ali jekla. Dovodne žice morajo biti zaradi korozivnih razmer ob anodi ustrezno protikorozijsko zaščitene. Zunanji elektrolit, s katerim je obdana anoda, je lahko nasičeni kalcijev hidroksid, natrijev borat, natrijev hidroksid ali voda. Običajno so v elektrolit primešana vlakna, tako da tvorijo pasto, s katero se lahko obrizga betonska površina. Med postopkom odstranjevanja kloridov je potrebno nadzorovati velikost električne napetosti in gostoto toka. Dolžina procesa (običajno od 6 do 10 tednov) se določi z rednim merjenjem vsebnosti kloridov v betonu in v elektrolitu. Kloridi se nato odstranijo skupaj z elektrolitom, površina betona pa se očisti.

Elektrokemijsko odstranjevanje klori-

dov se v praksi uporablja šele nekaj let, zato so podatki o dolgoročni učinkovitosti metode skopi /13/. Glede na dosedanje rezultate raziskav naj bi bila metoda elektrokemijskega odstranjevanja kloridov primerna predvsem za objekte, kjer so koncentracije kloridov relativno velike, vendar se korozijski proces še ni začel. Omenjena metoda se običajno kombinira s premazi za beton, da bi se upočasnila difuzija preostalih kloridov do armature ter preprečilo nadaljnje okuženje betona.

Zaradi visokih gostot električnega toka lahko pri omenjeni metodi nastopijo vsi negativni vplivi, opisani v tč. 5.1. Elektrokemijsko odstranjevanje kloridov ni dovoljeno predvsem pri prednapetih konstrukcijah, kjer bi vodikova krhkost visokotrdnostnih jekel lahko ogrozila varnost objekta.

5.4 Elektrokemijska realkalizacija

Pri armiranobetonskih objektih, kjer so karbonatizirane večje površine betona, je elektrokemijska realkalizacija praktično edini učinkoviti način sanacije. Če je korozija armature posledica karbonatizacije betona, se z uporabo enosmernega električnega toka in zunanjega elektrolita z visoko alkalnostjo zviša pH vrednost porne vode betona, s čimer se ustvarijo pogoji za repasivacijo jekla. Po vzpostavitvi želene pH vrednosti betona se proces realkalizacije prekine, začasne elektrode in elektrolit pa odstranijo. Površina betona se nato običajno zaščiti s premazom, da se prepreči ponovna karbonatizacija.

Elektrokemijska realkalizacija temelji na dveh procesih:

- transportu hidroksilnih (OH⁻) ionov iz elektrolita v beton z elektromigracijo, difuzijo in kapilarno absorpcijo,
- generaciji OH⁻ ionov na jeklu z elektrolizo.

Po osnovnih elektrokemijskih načelih je realkalizacija, z nekaj razlikami,

identična elektrokemijskemu odstranjevanju kloridov. Pri elektrokemijski realkalizaciji se kot anoda običajno uporablja jeklena mreža, kot elektrolit pa raztopina natrijevega karbonata. Gostota električnega toka je običajno nižja kot pri elektrokemijskem odstranjevanju kloridov (od 0.5 do 1 A/m²), pa tudi trajanje postopka je krajše (od 2 do 20 dni). Zaradi manjše gostote toka in trajanja postopka so negativni učinki elektrokemijske realkalizacije manj izraziti kot pri odstranjevanju kloridov.

5.5. Inhibitorji korozije v sistemu saniranja

Inhibitorji so snovi, ki že pri nizkih koncentracijah upočasnijo ali celo zaustavijo proces korozije. Po mehanizmu delovanja ločimo anodne, katodne in mešane inhibitorje. Anodni inhibitorji preprečujejo anodno reakcijo, tako da reagirajo s korozijskimi produkti in sodelujejo pri tvorbi pasivnih filmov na kovini. Katodni inhibitorji preprečujejo katodno reakcijo, mešani pa zavirajo

reakcije na anodnih in katodnih mestih. Anorganski inhibitorji (kalcijev nitrit, natrijev nitrit), ki se glede na mehanizem uvrščajo med anodne, se zadnjih 20 let uporabljajo kot dodatek cementu pri novogradnjah predvsem v korozijsko ogroženih okoljih /10/. Če je razmerje med nitridnimi in kloridnimi ioni premajhno, korozijskega procesa ne upočasnijo, temveč celo povečajo možnost jamičaste korozije. Zaradi problemov, povezanih s pravilnim doziranjem, in njihove ekološke oporečnosti se uporaba te vrste inhibitorjev opušča. V zadnjem času so postali aktualni organski inhibitorji. Njihova osnova so predvsem aminoalkoholi, nekaterim pa so dodane tudi anorganske snovi (največ fosfati). Mehanizem njihovega delovanja je mešan: z absorpcijo na jekleni površini tvorijo kompakten film, ki preprečuje anodne in katodne reakcije. Glede na podatke proizvajalcev se lahko uporabljajo kot dodatek cementu ali maltam ali pa kot premaz na betonu (penetracija do armature). Zato naj bi bili primerni pri protikorozijski zaščiti novogradenj, predvsem pa

pri sanacijah korozijsko ogroženih in poškodovanih objektov.

Uporaba organskih inhibitorjev za beton je še neuveljavljena metoda. Večina raziskav se je izvajala v laboratorijih, medtem ko so rezultati uporabe na zgrajenih objektih zelo redki /14/. Relativna mladost metode je tudi vzrok, da zaenkrat še ni nobenih dokazov o njeni dolgočasovni učinkovitosti. Zaradi aktualnosti problematike potekajo v večini razvitih držav intenzivne raziskave inhibitorjev /15-18/, katerih cilj je predvsem:

- določiti parametre, ki vplivajo na učinkovitost inhibitorjev,
- določiti koncentracijo inhibitorjev v bližini armature, ki bo zadostno upočasnila korozijski proces,
- raziskati vpliv neenakomerne koncentracije inhibitorjev na korozijski proces,
- določiti vpliv inhibitorjev na mehanske lastnosti betona, predvsem njegovo odpornost proti zmrzovanju,
- raziskati vpliv inhibitorjev na okolje,
- oceniti dolgočasovno učinkovitost inhibitorjev pri sanacijah in protikorozijski zaščiti objektov.

LITERATURA

- /1/ Guidance Report: Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures, CEB Bulletin d'information No. 243, Lausanne, May 1998;
- /2/ J. Žnidarič: Trajnost armarobetonских konstrukcij, Gradbeni vestnik št.8-9-10, Ljubljana 1996;
- /3/ RILEM Draft Recommendation for repair strategies for concrete structures damaged by reinforcement corrosion, Materials and structures, 1994, 27;
- /4/ ENV 1504-9: Products and systems for the protection of concrete structure. Part 9. General principles for the use of products and systems. July 1997;
- /5/ ENV 1504-10: Products and systems for the protection of concrete structure. Part 10: Site application of products and systems and quality control, Draft November 1998.
- /6/ Richtlinie für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Berlin 1990
- /7/ Richtlinie Erhaltung und Instandsetzung von Bauten aus Beton und Stahlbeton, Österreichischer Betonverein, Wien 1994
- /8/ R.E.Weyers et al.: Concrete Bridge Protection, Repair and Rehabilitation Relative to Reinforcement Corrosion, Strategic Highway Research Program – SHRP-S-360, Washington D.C. 1993
- /9/ U. Nürnberger: Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen, Bauverlag, Wiesbaden (1995)
- /10/ J. P. Broomfield, Corrosion of Steel in Concrete, E&FN SPON, London (1997)
- /11/ Korrosion von Bewehrungsstahl in Beton, W. Schwartz, editor, WTA Schriftenreihe, Aedificatio Verlag, Zürich (1999)
- /12/ COST 509: Corrosion and Protection of Metals in Contact with Concrete, Final Report, R.N. Cox, R. Cigna, O. Vennesland, editors, Edinburgh (1996)
- /13/ Electrochemical Rehabilitation Methods for Reinforced Concrete Structures – A State of the Art Report, J. Mietz, editor, European Federation of Corrosion by The Institute of Materials, London (1998)
- /14/ I.L. Al-Qadi, B.D. Prowell, R.E. Weyers, T. Dutta, H. Gougu, Concrete Bridge Protection and Rehabilitation: Chemical and Physical Techniques (Field Validation), SHRP-S-666, Washington (1993)
- /15/ Phanasaonkar, M., No. 178, 13th International Corrosion Conference, Melbourne (1996)
- /16/ Elsener, M. Buchler, H. Bohni, pp469-474, Eurocorr 97, Trondheim (1997)
- /17/ Bjegović, V. Ukrainczyk, B. Mikšić, No. 183, Corrosion 97 (1997)
- /18/ Legat, V. Kuhar, M. Turičnik, M. Leban, No. 32, Corrosion&Prevention-98, Hobart (1998)

UPORABA IN TRAJNOST CEMENTNIH MATERIALOV V ODLAGALIŠČIH NIZKO IN SREDNJE RADIOAKTIVNIH ODPADKOV

THE USE AND DURABILITY OF CEMENT MATERIALS IN LOW-INTERMEDIATE RADIOACTIVE WASTE DISPOSALS

UDK: 691.54 : 546.79.002.68

JANA ŠELIH

POVZETEK

Članek predstavlja del modela za oceno varnosti odlagališča nizko in srednje radioaktivnih odpadkov (NSRAO), ki obravnava umetne pregrade iz betona oz. cementnih materialov. Opisane so funkcije betona v umetnih pregradah, najpomembnejši agresivni vplivi okolja ter spremljajoči procesi v materialu. Posebno pozornost posveča članek dejavnikom, ki vplivajo na trajnost in odpornost betona, ki so specifični za odlagališča NSRAO in se ne pojavljajo v konvencionalnih betonskih objektih.

SUMMARY

A part of the safety assessment model for low - intermediate radioactive waste disposals dealing with concrete engineering barriers is presented. Main functions of concrete, the most important environmental influences and accompanying processes in the material are described. Special attention is directed to the factors influencing concrete durability and resistance that are not encountered in conventional concrete objects.

Avtor:

Doc. dr. Jana ŠELIH, dipl. inž. gradb., Vodja laboratorija za fizikalno-mehanske preiskave betona, Zavod za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva 12, 1000 Ljubljana

KLJUČNE BESEDE

odlagališče nizko in srednje radioaktivnih odpadkov, FEP lista, trajnost betona, izpiranje, zadrževanje radionuklidov

1. UVOD

1.1 SPLOŠNO

Ob obratovanju jedrske elektrarne se neizogibno pojavljajo radioaktivni odpadki (RAO), ki jih po stopnji

radioaktivnosti delimo na več kategorij: visoko, srednje in nizko radioaktivne. Med visoko RAO sodi zlasti izrabljeno radioaktivno gorivo, med nizko RAO in srednje RAO pa predmeti, ki so prišli v stik z radioaktivnimi snovmi: delovne obleke, zaščitne rokavice in podobno. Definicije kategorij RAO v Sloveniji so opisane v [1], priporočila IAEA (International Atomic Energy Association) za takšno klasifikacijo pa v [2].

Skoraj vse države po svetu, ki pridobovajo električno energijo tudi

v jedrskih elektrarnah, imajo predpise, da se visoko radioaktivni odpadki odlagajo ločeno od srednje in nizko radioaktivnih (NSRAO). VRAO se skoraj brez izjeme odlaga v podzemna odlagališča, NSRAO pa odlagajo v različnih državah v površinska ali podzemna odlagališča. V Sloveniji je predvidena gradnja odlagališča NSRAO, lokacija pa zaenkrat še ni znana. Ker je odlaganje VRAO mnogo bolj zahtevno kot odlaganje NSRAO, njihove količine pa so manjše, je odlaganje slovenskih predvideno v tujini.

Za oceno varnosti odlagališč RAO so v svetu razvili številne modele, ki so v splošnem namenjeni temu, da v končni fazi ocenijo zdravstvene posledice (radiološke in toksikološke) za ljudi in vso bioto. Modeli predvidevajo različne možnosti izpustov radionuklidov v različnih obratovalnih pogojih v različne elemente okolja, zato so kompleksni in sestavljeni iz več podmodulov.

Ne glede na vrsto odlagališča (površinsko ali podzemno) je potrebno v okviru modeliranja varnosti obdelati tri sklope: odlagališče v ožjem smislu besede, to je objekt, v katerem so odpadki, bližnje okolje (geosfero) in biosfero [3]. Modeliranje površinskih in podzemnih odlagališč je konceptualno enako, razlika je le v obravnavi geosfere, saj se pri površinskih odlagališčih postavlja vprašanje, kje je meja med geosfero in biosfero [4, 5].

Gradnja modela odlagalnega objekta se začne z osnovo, in sicer:

- z ocenjevanjem kontekstom, ki podaja ključne sestavine problema
- z opisom obravnavanega sistema (sestavnih elementov, prostorskih značilnosti) in
- z izčrpano FEP listo [1]

FEP (**F**eatures-**E**vents-**P**rocesses) lista je spisek lastnosti, stanj, dogodkov in procesov, ki so lahko pomembni za obravnavani problem v smislu njegove integritete in migracije radionuklidov. Določitvi osnov sledi *konceptualizacija* (zasnova) *modela*, sestavljena iz več podkorakov. Ključno opravilo je izbor oz. reševanje (screening) tistih elementov iz FEP liste, ki bodo vključeni v model in ocenjevalno orodje. V tem koraku se iz celotnega nabora FEP izbere tiste, ki so relevantni za nadaljnjo obravnavo. Če je struktura FEP jasna in logična, potem je reševanje liste oz. izbor FEP lažje in je možno izločati cele skupine FEP namesto posameznih. Nato sledi ugotavljanje in prikaz medsebojnih odnosov med izbranimi FEP. Za konceptualizacijo je na vrsti *podrobnejša specifikacija*, kjer

model preide v matematični opis posameznih komponent, matematični model pa nato prevedemo v ocenjevalno orodje (računalniški model), ki vključuje tudi podatkovne baze za identificiranje in vključene parametre.

Med sestavne elemente odlagališča NSRAO sodijo tudi *umetne pregrade iz cementnih materialov oz. betona*. Pod to oznako razumemo betonske podpore in obloge podzemnih odlagalnih prostorov, razne odlagalne module (kontejnerje) in razna betonska polnila pri imobilizaciji odpadkov v sodih [6]. Cementni materiali se torej v odlagališčih NSRAO uporabljajo:

- kot material v inženirskih barierah,
- kot material v konstrukcijskih elementih objekta in
- kot polnilo (tako imenovani matriks) za imobilizacijo (zalivanje) odpadkov.

Med projektirano življenjsko dobo odlagališča NSRAO, 300 let, moramo pri projektiranju umetnih pregrad iz betona zagotoviti ustrezno zadovoljivo obnašanje, ki ga ocenjujemo na podlagi trajnosti, uporabnosti, varnosti in videza [7]. Pravilno izbrani materiali so za doseganje projektirane življenjske dobe umetnih pregrad ključnega pomena. Materiale z najbolj ustreznimi lastnostmi ("**F**eatures" v FEP listi) pa lahko izberemo glede na okolje, ki mu bo pregrada izpostavljena, saj agresivnost okolja odločilno vpliva na vrsto, začetek in hitrost procesov propadanja betona ("**P**rocesses" v FEP listi).

V pripravljalni fazi, to je še pred začetkom projektiranja, je v okviru ocene varnosti odlagališča potrebno, kot smo že opisali, pripraviti in prerešetati listo FEP. Lista FEP vsebuje tudi spisek vseh možnih dogodkov, ki se lahko zgodijo v okolju pregrade ("**E**vents" v FEP listi) in njihovo delovanje nanjo, zato jo lahko kasneje uporabi projektant, da lahko kar najbolj zanesljivo predvidi tip in agresivnost

okolja in njegovo spreminjanje s časom. Kolikor se okolje spreminja drugače, kot je bilo predvideno, je med življenjsko dobo potrebno spremljati tudi stanje betona in izvesti ustrezna popravila, ki bodo dvignila zadovoljivost obnašanja na zahtevano raven.

Kot lahko vidimo, so stanja, lastnosti in dogodki, ki so zbrani v FEP listi za betonske pregrade, medsebojno povezani. V preglednici 1 podajamo za ta primer FEP listo v zgoščeni obliki.

V tem članku se bomo posvetili tistim elementom liste FEP, ki ali najbolj vplivajo na trajnost in odpornost betona v odlagališčih NSRAO, ali pa so specifični za umetne pregrade iz betona v odlagališčih NSRAO in se ne pojavljajo v konvencionalnih betonskih objektih.

Odpornost pomeni sposobnost materiala, da se med uporabo upira spremembam lastnosti in razpadanju zaradi agresivnih vplivov. Pri tem gre običajno za zelo zapletene procese oz. mehanizme razpadanja. Odpornost betona je odvisna od:

- uporabljenih materialov ter sestave in strukture betona
- vrste in jakosti zunanjih vplivov na konstrukcijo

Ista vrsta betona ima lahko pri različnih zunanjih vplivih različno odpornost, zato omogoča različno življenjsko dobo konstrukcije.

1.2 Pomembnost posameznih agresivnih vplivov na beton v različnih fazah življenjske dobe odlagališča NSRAO

Ob začetku uporabe, to je po odprtju odlagališča, v neposredni okolici odlagališča zaporedno potekajo naslednji procesi in dogodki [1]:

1. Podtalnica ponovno zalije cono v matični kamnini, ki je bila izsušena zaradi drenaž med gradnjo. Glinene bentonitne

zaščitne bariere absorbirajo vodo in začnejo nabrekati.

2. Voda doseže betonske pregrade odlagalnih objektov in začne prodirati skozi beton. Po zasičenju doseže voda jeklene sode, v katerih so stabilizirani odpadki. Začne se korozija jeklenih sodov, ki zaradi tega po določenem času mehansko razpadejo. Stabilizirani odpadki pridejo tako v neposreden stik z vodo. Tudi po mehanskem razkroju soda ima železo dovolj velik vpliv na kemijo vode v stiku z matrico, tako da so zagotovljeni redukcijski pogoji, ki omejujejo mobilnost radionuklidov.
3. Hitrost propada imobiliziranih odpadkov je odvisna od uporabljenega matriksa. V vseh primerih, ne glede na vrsto uporabljenega matriksa, pa pride do izluževanja radionuklidov iz stabilizirane oblike odpadkov.
4. Radionuklidi v raztopini prehajajo iz neposredne okolice odlagališča RAO z difuzijo skozi ostanke sodov in vsebnikov, betonskih pregrad in polnila. Hitrost prehoda je odvisna od difuzijskih koeficientov posameznih materialov.

Na podlagi opisanega predvidenega poteka dogajanj lahko ugotovimo, da so cementni materiali v funkciji matriksa izpostavljeni agresivnim vplivom okolja šele po poškodbah sklopa umetnih ovir, ki obdajajo odlagališče. Glavni agresivni vpliv, ki po teh dogodkih deluje na stabilizirane odpadke, je izpostavljenost toku podtalnice, zaradi katerega pride do izpiranja radionuklidov iz imobiliziranih odpadkov.

Kolikor se to dogaja po končani fazi institucioniranega nadzora, je smiselno še naprej zagotoviti monitoring pH vrednosti v neposredni okolici odlagalnega objekta, saj bazičnost odločilno vpliva na hitrost izpiranja radionuklidov iz matriksa. Umetne pregrade, ki so v stiku z

"zunanjim" okoljem (geosfero), pa so med svojo življenjsko dobo izpostavljene različnim procesom propadanja, ki jih določa okolje, in ki so opisani v npr. [8]. Pričakovane tipe okolja odlagališč NSRAO v Sloveniji in njihovo agresivnost v zvezi s pregradami bomo opisali v naslednjem razdelku. Pri tem moramo poudariti, da je te agresivne vplive možno natančno določiti le za znano, določeno lokacijo odlagališča, kar velja zaradi geološke raznolikosti še zlasti za Slovenijo.

2. AGRESIVNI VPLIVI NA BETON V ODLAGALIŠČIH NSRAO

Tako nearmirani kot armirani beton sta v splošnem podvržena enakim procesom propadanja z izjemo procesa korozije armature, ki je prisotna le pri armiranem betonu. Pričakujemo lahko, da bodo konstrukcijski elementi v odlagališču in umetne pregrade narejeni iz armiranega betona, matriks (material za imobilizacijo RAO) pa je nearmiran beton, v katerega so zamešani radioaktivni odpadki. Poleg agresivnih vplivov, ki so možni tudi v konvencionalnih betonskih objektih, je potrebno posvetiti posebno pozornost tudi eventualnim vplivom radionuklidov na trajnost betona ter procesom migracije/retardacije radionuklidov v betonu.

2.1 Izpiranje (izluževanje)

Izluževanje je proces, kjer se trdna snov raztaplja v vodi, ki je lahko stoječa ali tekoča. Beton tvori agregat in cementni kamen, ki predstavlja vezni material (ki obdaja in veže posamezna agregatna zrna). Na izpiranje je zaradi svoje kemijske sestave občutljiv zlasti cementni kamen. Če je beton izpostavljen tečenju vode pod tlakom, npr. toku podtalnice, voda izpira trdno matrico. Najprej se raztopijo najbolj topni produkti cementnega kamna, kamor sodi na prvem mestu kalcijev

hidroksid. Raztapljanje se ustavi, ko je raztopina nasičena, pri čemer je potrebno upoštevati, da je stopnja nasičenosti odvisna tudi od prisotnosti drugih raztopljenih snovi [8, 9].

Vsi cementni materiali v odlagališčih NSRAO so lahko med svojo življenjsko dobo izpostavljeni izpiranju, pri vsakem od njih pa lahko izpostavimo svoje značilnosti.

2.1.1 IZPIRANJE BETONA KOT MATRIKSA ZA IMOBILIZACIJO ODPADKOV

V cementnih materialih, ki se uporabljajo kot sredstvo za imobilizacijo NSRAO, lahko pride do izpiranja v primeru, da se sklop umetnih pregrad, ki obdajajo cementirane odpadke, poškoduje. Iz imobiliziranih (cementiranih) RAO se v takem primeru začnejo izluževati radionuklidi, ki nato prehajajo v geo- in biosfero.

Izpiranje izotopa ogljika C-14 iz cementne oblike RAO so raziskali z eksperimentom, kjer so vzorec izpostavili izpiranju na eni strani [10]. Pri nizki hitrosti izpiranja je bil pH visok, kar preprečuje sproščanje C-14 iz vzorca, zato ni bilo vidne (izmerljive) aktivnosti C-14. Le-ta je nastopila pri veliki hitrosti izpiranja, kjer se pH zniža, kar kaže na kombinirana delovanja kemične reakcije in fizičnega razredčevanja izpranega materiala. V takšnih pogojih se C-14 raztaplja.

Pomemben parameter, ki vpliva na trajnost betona, izpostavljenega izpiranju cementne matrice ob prisotnosti radionuklidov, je bazičnost (pH) betona [11]. Nekateri raziskovalci celo definirajo "življenjsko dobo" odlagališča kot časovno dobo, med katero je pH porne vode v stabiliziranih odpadkih večji od določene vrednosti ($\text{pH} > 10,5$). V idealnem "zaprtim sistemu" se koncentracija alkalnih hidroksidov v porni vodi ne spreminja in pH ostaja nespremenjen. V realni situaciji pa se koncentracija alkalnih hidroksidov manjša. Ob zniževanju

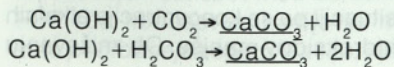
pH se C-S-H gel, ki sestavlja cementni kamen, raztaplja in izpiranje cementne matrice vodi k propadu materiala. Od vseh sestavnih komponent v strjeni cementni pasti (cementnem kamnu) najbolj vpliva na pH kalcijev hidroksid $\text{Ca}(\text{OH})_2$, ki zavzema 25-30% cementnega kamna iz običajnega Portlandskega cementa. Vzdrževanje visokega pH ni izključno odvisno od količine prisotnega $\text{Ca}(\text{OH})_2$, temveč od tega, ali je prisoten v obliki, ki je dostopna osrednjemu delu porne tekočine [11].

2.1.2 IZPIRANJE BETONA, VGRAJENEGA V INŽENIRSKO BARIERE IN KONSTRUKCIJSKE ELEMENTE

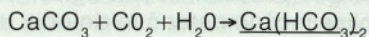
Na umetno betonsko pregrado, ki je v stiku z medijem, v katerem se odlagališče nahaja, lahko deluje tok vode, ki je v mediju. Pri tem prihaja do izpiranja trdne cementne matrice, ki vodi k večanju por, skozi katere teče voda. Poroznost in prepustnost betona se povečujeta, kar vpliva na nadaljnje povečevanje vodnega toka skozi beton. Beton razpada in efektivni prerezi konstrukcije se zmanjšajo, kar zmanjša konstruktivno varnost objekta in vodi k temu, da material ne ustreza več zahtevanim pogojem trajnosti in neprepustnosti za migracijo radionuklidov. V skrajnem primeru, ko je beton popolnoma razpadel, je prehod radionuklidov skozi betonsko pregrado skoraj neoviran.

2.1.3 DELOVANJE CO_2 - KARBONATIZACIJA

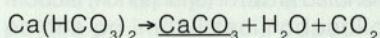
Ogljikov dioksid obstaja v več oblikah: kot prosti CO_2 v zraku, kot trdno vezani CO_2 v karbonatih (npr. CaCO_3), kot delno vezani CO_2 v hidrokarbonatih (npr. $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) in v vodi kot ogljikova kislina. Apno, ki je v betonu sproščeno s hidrolizo z ogljikovo kislino, prehaja v slabo topljivi karbonat:



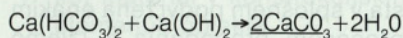
Ta pojav imenujemo *karbonatizacija betona*, zaradi katere pade alkalnost betona ($\text{pH} < 10$), s tem pa njegova sposobnost zaščite vgrajene armature pred korozijo. Potem ko se zaradi karbonatizacije pH vrednost betona še nadalje znižuje ($\text{pH} < 7$), se v naravnem vlažnem okolju tvori lahko topni kalcijev bikarbonat:



Ta lahko razpade in na površini se izloča apnenčeva siga:



ali pa se ponovno veže z apnom v cementnem kamnu, kar omogoča ponovno zatesnitev betona in zalečenje razpok [8]:



Za stabilizacijo radionuklidov in zmanjševanje nevarnosti izpiranja so potencialno uporabne mineraloške spremembe, povezane s karbonatizacijo cementnega kamna, ki imajo za končen produkt kalcitne spojine. Karbonatizacija vodi k zmanjšanju permeabilnosti in poroznosti cementnega kamna ter k povečanju notranje specifične površine, saj se prvotne velike makropore napolnijo z drobnimi kalcitnimi zrni. Voda, ki nastane med karbonatizacijo, prav tako polni pore, in onemogoča penetracijo ogljikovega dioksida v notranjost malte/cementnega materiala. Zaradi zmanjšane poroznosti in prepustnosti pride do zmanjšanja vodnega toka, ki ima za posledico zmanjšano izpiranje in upočasnen transport radionuklidov iz imobiliziranih RAO.

2.2 Vpliv radioaktivnih odpadkov na trajnost betona

Poleg agresivnih vplivov, ki v splošnem delujejo na beton, lahko vpliva na trajnost betona oz. cementnih materialov v odlagališčih NSRAO tudi prisotnost radioaktivnih odpadkov. Le-ta lahko vpliva na beton na več načinov. Beton uporabljamo v odlagališčih NSRAO v različne

namene, zato nas zanimajo različni vidiki trajnosti materiala. Pri cementnih materialih, ki se uporabljajo za imobilizacijo odpadkov (matriksu), je zlasti pomembna njihova sposobnost zadrževanja (retardacije) radionuklidov. Le-ta je največja takoj po zamešanju betona. Ko je betonska mešanica, v katero zamešamo radioaktivne odpadke, še sveža, hitrost hidratacije pa velika, se radionuklidi kemično vežejo v strukturo ali pa adsorbirajo. Zaradi kompleksnosti in dinamike kemijskega sistema je v fazi hidratacije omenjena procesa težko obravnavati ločeno.

Med gradnjo objektov odlagališča radioaktivnih odpadkov na lokaciji odlagališča še ni, zato beton, ki je vgrajen v konstrukcijske elemente in umetne pregrade, med procesom hidratacije (otrjevanja) ni izpostavljen prisotnosti radionuklidov. To se zgodi šele, ko radionuklidi, imobilizirani v matriksu, zaradi različnih transportnih mehanizmov prehajajo skozi posamezne plasti odlagalnega objekta. Beton v armiranobetonskih konstrukcijskih elementih in inženirskih barierah pa je tedaj že v otrdelem stanju.

2.2.1 KEMIČNO VEZANJE RADIONUKLIDOV V TRDNO MATRICO BETONA

Radionuklidi lahko migrirajo skozi pore otrdelega betona, ki je porozen material. Na tej poti se lahko kemično vežejo s trdno matrico materiala - tako cementnega kamna kot agregata. Če so končni produkti teh reakcij manj stabilni, se lahko trdnost kompozitnega materiala zmanjša, kar lahko vpliva na konstruktivno varnost betonskega elementa. V primeru, da je specifični volumen končnih produktov večji od specifičnih volumnov prvotnih spojin, lahko pride do povečanih pritiskov na trdno matrico, pojava mikrorazpok in s tem do degradacije betona.

V razpoložljivi literaturi, ki obravnava interakcijo radionuklidov in betona, podatkov o takšnih učinkovanjih

kemično vezanih radionuklidov ni.

2.2.2 ADSORPCIJA IN ZADRŽEVANJE RADIONUKLIDOV

Med migracijo radionuklidov skozi pore betona prihaja tudi do adsorpcije radionuklidov na stenah por. Ta proces ne vpliva na trajnost materiala, pač pa pripomore k zadrževanju (retardaciji) radionuklidov v betonu. Ker je specifična površina betona, še zlasti pa cementnega kamna, velika, je lahko prispevek k retardaciji precejšen.

Z zadrževanjem in adsorpcijo radionuklidov sta povezani hitrost in učinkovitost imobilizacije radioaktivnih odpadkov, na samo trajnost hidratacijskih produktov pa ta dva pojava nimata vpliva.

Sposobnost, kolikšno količino radionuklidov lahko neki material adsorbira, lahko opišemo s *koeficientom porazdelitve* K_d [12]. K_d je razmerje med koncentracijo kontaminanta, ki se adsorbira na trdno snov (na enoto mase), in koncentracijo kontaminanta v raztopini (na enoto volumna). Pregled literature za svežo cementno pasto s porno vodo s $pH > 10,5$ kaže, da vrednosti za K_d za adsorpcijo radionuklidov v cementu in betonu, dobljene v različnih študijah, močno variirajo. V kvalitativnem pogledu pa kažejo različne študije na enako adsorpcijsko obnašanje radionuklidov; tako se aktinidi (npr. uran) v cementni pasti močno adsorbirajo, radij, stroncij, tehnecij se adsorbirajo zmerno, cezij in klorin pa se v cementni pasti adsorbirata slabo. Za svežo cementno pasto velja, da so vrednosti za K_d zelo velike, prav tako pa so veliki razponi rezultatov, dobljeni v posameznih študijah. To lahko pripišemo dejstvu, da so v tem stanju hidratacijske reakcije močno prisotne, hidroksidni ioni se izlučujejo v porno vodo v velikih količinah in hidratacijski produkti še niso termodinamično stabilni [12].

Po konvenciji Bradburyja in Sarotta

[13] ločimo tri fizikalno-kemična okolja, skozi katera gre cementni material, in na podlagi katerih lahko kategoriziramo vrednosti koeficienta K_d . Okolje I je prisotno v cementni pasti takoj po tem, ko otrdi; porno voda je močno bazična in ima pH večji od 12,5, visoko ionsko moč in visoke koncentracije kalija in natrija. V okolju II, kjer so topne alkalne soli vse raztopljene, se pH porne vode vzdržuje na vrednosti 12,5 s pomočjo raztapljanja $Ca(OH)_2$. V okolju III kontrolira pH porne vode raztapljanje cementnega kamna oz. C-S-H gela, ionska moč porne tekočine je nizka, in vrednost pH je 10 ali manj.

Vrednosti koeficienta K_d v okolju III so približno 10-krat manjše od vrednosti K_d v okolju II za večino radionuklidov. Tako velik upad koeficienta na prehodu iz okolja II v okolje III je posledica tega, da se najprej raztopijo komponente C-S-H gela z veliko specifično notranjo površino, zato se specifična notranja površina, kjer se adsorpcija dogaja, močno zmanjša.

Za uran se gibljejo vrednosti K_d od 350 do 13000 ml/g, s povprečjem ca. 1000 ml/g. Vrednosti za K_d se niso bistveno spremenile, če je bila cementu dodana žilindra, za katero sicer pričakujemo, da bo delovala kot reduktant in da bo njena prisotnost vrednost koeficienta K_d dvignila [12].

Številčne vrednosti za koeficient porazdelitve različnih radionuklidov so dobro definirane za glinene materiale [14], težje pa so dostopni podatki o njihovih vrednostih za beton [15]. Razlogi za pomanjkanje podatkov so verjetno v tem, da so adsorpcijske lastnosti betona močno odvisne od njegove porozne strukture (ki jo določajo prvenstveno vodoce-mentno razmerje, tip agregata, količina in vrsta dodatkov, pa tudi drugi parametri) in vrste cementa, ki vpliva na kemijsko površinsko aktivnost v porah cementnega kamna.

2.2.3 RADIOLIZA

Na trajnost umetnih pregrad iz betona lahko vpliva tudi radioliza. Radioliza je kemijski razkroj snovi, običajno vode, zaradi sevanja. Povečano sevanje, ki ima za posledico radiolizo materialov, iz katerih so izdelane zaščitne bariere, lahko pričakujemo le v ožji okolici visoko in srednje radioaktivnih odpadkov. Neprimerno bolj pomembna pa je radioliza porne vode, pri kateri nastajajo enake količine oksidantov in reducentov (e_{aq}^- , H^+ , HO_2^- , H_2O_2 , H_2 , O_2), njihove koncentracije pa so odvisne od energije sevanja. Ti primarni produkti radiolize reagirajo med seboj in z ionskimi specijami v raztopini, pri čemer nastajajo sekundarni produkti, ki so odvisni od kemizma porne vode. Glavni reducent H_2 hitro migrira iz sistema, tako da v ožjem vplivem območju ostane presežek oksidantov, oksidacijska fronta se premika [1]. Presežek oksidantov povzroča pospešeno korozijo jekla, torej tudi armature v umetnih pregradah.

2.2.4 SPROŠČANJE TOPLOTE PRI RAZPADU RAO

Pri nizko in srednje radioaktivnih odpadkih je sproščanje toplote pri razpadu majhno, zato je porast temperatur v odlagališču zanemarljiv [16]. Zaradi neenakomernega temperaturnega gradienta se tako v betonskih pregradah ne pojavljajo dodatne toplotne napetosti, ki bi lahko vodile k pojavu razpok. Temu pojavu je potrebno posvetiti pozornost le, če so debeline sten velike.

3. PRIČAKOVANI TIPI OKOLJA ODLAGALIŠČ NSRAO IN NJIHOV VPLIV NA BETON

Zemljine in hribine imajo pri odlagalnemu objektu vlogo bariere, ki preprečuje oz. zadržuje prehod radionuklidov v biosfero. Za odlagališča NSRAO so zato primerne slabo prepustne zemljine in hribine. Za

večino hribin in zemljin na področju Slovenije, ki jih štejemo za slabo prepustne, je značilna velika heterogenost. *Permokarbonske kamnine* so sestavljene iz izmenjajočih se plasti različnih klastičnih kamnin in tanke pole meljevcev in peščenjakov se izmenjujejo s skrilavimi glinovci. Koeficienti hidravlične prepustnosti za takšne kamnine se gibljejo od 10^{-11} do 10^{-6} m/s. Prav tako so slabo prepustne miocenske hribine, ki so običajno sestavljene iz laporovcev. Občasno pa se med laporovci, ki prevladujejo, pojavljajo razpokani peščenjaki, iz katerih doteka voda. Prepustnosti so velikostnega reda od 10^{-11} do 10^{-8} m/s. Slabo prepustne so tudi magmatske in metamorfne kamnine, vendar ni bilo za te kamnine narejenih nobenih hidrogeoloških raziskav [17].

Za študijo vplivov okolja na betonske materiale v odlagališču NSRAO zato privzemamo, daje odlagališče locirano v glinastih skrilavcih (permokarbon) ali laporovcih (miocen).

3.1 Površinska odlagališča

Umetne pregrade, ki se uporabljajo pri površinskih odlagališčih, so izpostavljene podobnemu okolju kot večina konstrukcij, to je zraku, ki se mu temperatura in relativna vlažnost spreminjata v skladu z vremenskimi razmerami. Ker slovensko podnebje ne dopušča ekstremnih vrednosti relativne vlažnosti in temperature zraka, spada takšno okolje v kategorijo nizko/zmerno agresivnega okolja [7], kljub temu da je pozimi možen nastop zmrzali.

3.2 Podzemna odlagališča

Zunanje okolje umetnih pregrad pri tem tipu odlagališča predstavlja hribina, za katero privzamemo, da je glinasti skrilavec ali laporovec. Zaradi slabe prepustnosti hribine lahko pričakujemo na stiku betona in hribine majhne količine vode, ki pronica v beton zelo počasi.

3.3 Agresivni vplivi podzemnih vod na beton

V podzemnih vodah so lahko raztopljene različne agresivne snovi, kar je odvisno od zunanjih pogojev in vrste hribine. Najpogostejše najdemo v podzemnih vodah kloride (Cl^-), sulfate (SO_4^{2-}), amonijeve ione (NH_4^+) in magnezij (Mg^{2+}).

V Sloveniji so koncentracije kloridov praviloma zelo nizke in ne presegajo 10 mg/l. Ta koncentracija je izjemoma presežena tam, kjer je podzemna voda močno onesnažena zaradi posipanja cest. Vir kloridov v podzemni vodi so lahko tudi mineralne vode, npr. v SZ Sloveniji v globljih miocenskih vodonosnikih, kjer vrednosti koncentracije kloridov dosežejo do 300 mg/l. Podzemni betonski objekt v glinastih skrilavcih in laporovcih v Sloveniji torej ni izpostavljen kemični koroziji zaradi kloridov, saj je tveganje korozije armature v betonu majhno, če koncentracija kloridov ne presega 0.4% mase cementa [7].

Izvor sulfatov v podzemni vodi je v Sloveniji vezan na raztapljanje anhidrita in sadre in oksidacijo sulfidnih mineralov (predvsem pirita). Sadra se pojavlja v obliki leč v srednje triasnih plasteh in v zgornjem permu, v permokarbonskih in miocenskih kamninah pa je ni. Ob oksidaciji sulfidnih mineralov nastajajo večje količine sulfatov. Ti minerali se v večjih koncentracijah pojavljajo v glinovcih in drugih klastičnih kamninah. V glinastih skrilavcih in laporovcih so torej koncentracije sulfatov v podzemni vodi zanemarljive, zato beton v stiku s podzemnimi vodami ni izpostavljen sulfatni koroziji (meje šibko agresivnega okolja za SO_4^{2-} : 200-600 ml/kg) [7].

Povečane koncentracije magnezija so možne v Sloveniji v nekaterih dolomitih, možne pa so v nekaterih mineralnih vodah, ki se lahko pojavljajo v miocenskih plasteh. Koncentracije praviloma ne presegajo 65 mg/l, kar pomeni, da je takšno okolje za beton šibko agresivno (meje šibko

agresivnega okolja za Mg^{2+} : 100-300 ml/kg) [7].

Prisotnost amonija (NH_4^+) je posledica redukcijskega okolja. V Sloveniji lahko le izjemoma pričakujemo koncentracije, višje od 15 mg/l. Meje šibko agresivnega okolja za NH_4^+ so od 15-30 ml/kg [7].

Povečane koncentracije ogljikovega dioksida, CO_2 , zasledimo tam, kjer so področja bogata z rastlinsko odejo in tam, kjer se pojavlja plitev tok podzemne vode v obliki podpovršinske ali viseče podtalnice. Zaradi prisotnosti ogljikovega dioksida se poveča možnost karbonatizacije betona. Če so količine agresivnega CO_2 med 15 in 30 ml/g, štejemo, da je okolje do betona šibko agresivno.

Ob oksidaciji sulfidov se lahko pojavi nizek pH podzemne vode. Sulfide vsebujejo nekatere permokarbonske kamnine (npr. polimetalna rudišča v okolici Litije) in tam lahko zato opazimo vodo z nizkim pH. Voda se šteje kot močno agresivna, če je njen pH manjši od 4, in šibko agresivna, če je pH med 5.5 in 6.5. V permokarbonskih kamninah se lahko pojavlja voda z nizko trdoto, ki pospešuje izpiranje betona.

4. ZAKLJUČEK

Beton predstavlja s svojimi lastnostmi, kot so dostopnost, nizka cena, nosilnost, trajnost in neprepustnost, nadvse primeren material za umetne pregrade v odlagališčih NSRAO. Ker je projektirana življenjska doba odlagališča NSRAO 300 let, je potrebno pri zasnovi in gradnji posebno pozornost posvetiti trajnosti uporabljenih materialov, saj lahko le tako zagotovimo zadovoljivo raven obnašanja celotnega objekta (odlagališča) med celotno življenjsko dobo. Trajnost materiala pa lahko ocenjujemo in zagotavljamo le, če poznamo okolje, ki mu je material izpostavljen, in mehanizme možnih procesov propadanja.

Pri definiranju okolja umetnih pregrad iz betona obravnava članek oba

možna tipa odlagališč, podzemnega in površinskega. Glavna razlika med njima je, kar se tiče vplivov okolja, daje betonska pregrada v primeru površinskega odlagališča izpostavljena zlasti zmrzovanju in atmosferskim vplivom, v primeru podzemnega odlagališča pa je možnost zmrzovanja zanemarljiva, upoštevati pa je potrebno vplive agresivnih kemičnih snovi iz okolišnje hribine in pronicanje vode. Ti pogoji so odvisni od vrste kamnine na izbrani lokaciji.

Model, ki se uveljavlja v svetu za oceno varnosti odlagališča NSRAO, temelji na konceptu FEP liste (Features, Events, Processes) za določevanje najpomembnejših agresivnih dejavnikov, procesov in lastnosti za cementne materiale, vgrajene v razne komponente odlagališča NSRAO. Izdelava FEP liste in reševanje njenih elementov vodi k izbiri najpomembnejših dogodkov, procesov in lastnosti.

Opravljen identifikacija relevantnih agresivnih vplivov na beton v odlagališčih NSRAO [5] predstavlja del gradnje modula odlagalnega objekta (glej poglavje 1) [1]. Članek pa se posveča tistim elementom FEP liste, ki so specifični za beton, ki se uporablja v odlagališčih NSRAO, in ki jih ne srečamo v konvencionalnih betonskih objektih.

Iz pregleda agresivnih vplivov, ki

so najbolj relevantni za betonske materiale v odlagališčih NSRAO, lahko povzamemo, da je za beton v umetnih inženirskih pregradah najbolj pomemben parameter, ki je mera trajnosti materiala, njegova prepustnost oz. permeabilnost. Da zagotovimo ustrezno, zahtevano dolžino življenjske dobe pregrade, mora biti beton čimbolj neprepusten, saj s tem preprečimo vdor eventualnih agresivnih v snovi iz zunanjega okolja v beton in upočasnimo izpiranje cementnega kamna v primeru prisotnosti podtalnice.

Neprepustnost betona zagotovimo na različne načine tako med fazo projektiranja kot v fazi gradnje. V času projektiranja moramo izbrati takšne vrste in razmerja osnovnih materialov (cement, agregat, dodatki), da zagotavljajo končnemu izdelku nizko prepustnost, predpišemo ustrezno nego betona, eventualno predvidimo površinsko zaščito betona (na dostopnih površinah, kjer lahko med življenjsko dobo izvajamo nadzor) ipd. Priporočljivo je dodajanje mikrosilike ali žlindre, ki močno znižata prepustnost betona. V primeru da takšni dodatki zmanjšajo obdelavnost sveže betonske mešanice, ki je potrebna za kakovostno vgrajevanje betona, moramo predvideti tudi kemijske dodatke (superplastifikatorje). Prav tako je, če pogoji okolja to zahtevajo, potrebno zagotoviti zmrzlinosko obstojnost, ki jo običajno dosežemo z dodajanjem

kemijskega dodatka - aeranta.

Beton, ki se uporablja kot sredstvo za imobilizacijo, je najbolj izpostavljen izpiranju. Do tega pojava pride šele tedaj, ko je sklop umetnih pregrad, ki obdajajo stabilizirane odpadke, poškodovan. Kolikor se to dogaja po končani fazi institucionalnega nadzora, je smiselno še naprej zagotoviti nadzor (monitoring) pH vrednosti v neposredni okolici odlagalnega objekta, saj bazičnost odločilno vpliva na hitrost izpiranja radionuklidov iz matriksa.

Trajnost betona lahko zagotovimo s sistematičnim in skrbnim načrtovanjem v fazi projektiranja, v fazi gradnje pa je, da bi material zadostil projektnim zahtevam in specifikacijam, potrebna za doseganje predpisanih lastnosti betona stalna kontrola kakovosti in nadzor del.

5. ZAHVALA

Zahvaljujem se Agenciji za radioaktivne odpadke za financiranje raziskovalne naloge z naslovom »Kemijski in fizikalni procesi pri odlaganju NSRAO - obstojnost umetnih pregrad iz betona«, iz katere izhaja ta članek.

Za pregled in dopolnitve teksta se zahvaljujem J. Žnidariču.

Preglednica 1: FEP (Features, Events, Processes) lista za umetne pregrade iz betona

LASTNOSTI IN STANJA (Features)

- Sestava kompozitnega materiala
- Poroznost
 - poroznost cementnega kamna, poroznost agregata, poroznost kompozita
- Porazdelitev velikosti por
- Prepustnost za plin
- Prepustnost za vodo
- Tlačna in natezna trdnost
 - trdnost cementnega kamna, agregata in kompozitnega materiala
- Vodocementno razmerje
- Dolžina časa nege
- Prisotnost vode v porah
- Odpornost na procese propadanja
 - zmrzovanje, izpiranje, korozijo, nabrekanje
- Požarna odpornost

DOGODKI (Events)

- Zmrzal
- Požar
- Vdor agresivnih substanc iz okolja
- Prisotnost podtalnice (delovanje hidrostatskega pritiska)
- Mehanske obremenitve; delovanje povišanega pritiska (v primeru sproščanja plinov) delovanje zemeljskih pritiskov, potres

PROCESI (Processes)

- Razpokanje
- Zmrzal
- Erozijska
- Abrazija
- Kavitacija
- Izpiranje
- Obarjanje
- Krčenje
- Kislinjska korozija
- Sulfatna korozija
- Alkalna korozija (alkalno karbonatna ali alkalno silikatna)
- Dehidracija cementnega kamna
- Karbonatizacija
- Biodegradacija
- Kristalizacija
- Difuzija
- Sorpcija
- Advekcija
- Konvekcija
- Radioliza

LITERATURA

- [1] Osnove za pripravo konceptualnih in matematičnih modelov za oceno varnosti odlagališča NSRAO, poročilo IJS št. 7853, Inštitut Jožef Stefan, Ljubljana, 1998
- [2] IAEA SS No. 111-G-1.1: Classification of Radioactive Waste, Vienna, 1994
- [3] AECL: The Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste: The Geosphere Model for Postclosure Assessment, AECL-10719, COG-93-9, April 1994
- [4] BIOMASS: The IAEA co-ordinated research programme on BIOSphere Modelling and Assessment, Working Groups meetings 1996-1997
- [5] B. Petkovšek, J. Žnidarič, J. Šelih, B. Kontič, Kemijski in fizikalni procesi pri odlaganju RAO - obstojnost umetnih pregrad iz betona, študija št.P 71280-750-1/98, Zavod za gradbeništvo Slovenije, Ljubljana, 1998.
- [6] K. Fink, J. Urbanc, J. Uhan, P. Kralj, Materiali, primerni za izdelavo umetnih ovir pri odlaganju nizko in srednje radioaktivnih odpadkov, končno poročilo, pog. št.PR94-O1/94, EGS-RI d.d. Maribor, 1995
- [7] Durable concrete structures, Design Guide, Comité Euro-International du Béton (CEB), Thomas Telford Services, London 1992.
- [8] J. Žnidarič, Trajnost armiranobetonskih konstrukcij, Gradbeni vestnik, št.45, 17121 I, 1996.
- [9] D.P. Bentz, E.J. Garbocz, Modeling the leaching of calcium hydroxide from cement paste: effect on pore space percolation and diffusivity, <http://ciks.cbt.nist.gov/garbocz/paper26/paper26.html>, 1997
- [10] R. Dayal in E.J. Reardon, Cement-based engineered barriers for carbon-14 isolation, Waste Management, 12, 189-200, 1992
- [11] Atkins in F.P. Glasser, Application of Portland cement based materials to radioactive waste immobilization, Waste Management, 12, 105-131, 1992
- [12] Krupka, J.M. in Serne, R.J., Geochemical effects on the behaviour of LLW radionuclides in soil/groundwater environments, US Department of Energy Low Level Radioactive Waste Management Conference, 1995, <http://www.inel.gov/resources/research/.lrw/1995Conferenceltrack1/is-4.html>
- [13] Bradbury, M.H., in Sarrot, F.A., Sorption databases for the cementitious near-field of a L/IRW repository for performance assessment, PSI Bericht Nr.95-06, 1995
- [14] AECL: The Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste: Engineered Barriers Alternatives, AECL-10718, COG-93-8, 1994.
- [15] Branch technical position on a performance assessment methodology for low level radioactive waste disposal facilities, NUREG-1573, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1997
- [16] Mann, Containment of nuclear material: the perspective of the structural engineer, Containment structures: risk, safety and reliability, str.97-108, E&FN Spon, London, 1995
- [17] Brenčič, M., Agresivnost podzemne vode na beton v nizko propustnem geološkem okolju, Poročilo št. H-II-30D-A-1/13, IGGG, Ljubljana, 1998

NOVE UREDBE IN HARMONIZACIJA Z EVROPSKIMI PREDPISI

UDK: 341.217 (4) : 340.13 (497.12)

NATAŠA ŽITKO ŠTEMBERGER

Avtor:

Nataša Žitko Štemberger, Ministrstvo za okolje in prostor, Uprava RS za varstvo narave, Vojkova 1a, 1000 Ljubljana

Pogoj za članstvo v Evropski uniji je, da države kandidatke na vseh področjih prilagodijo svoje notranje pravne sisteme obstoječi zakonodaji EU. Okoljska zakonodaja v tem procesu ni nikakršna izjema. Proces vključevanja prava EU v notranje-pravne upravne sisteme se imenuje proces zблиževanja. Cilj tega procesa na področju okolja je zagotoviti popolno prilagoditev notranje okoljske zakonodaje in ustreznega upravnega sistema tako, da v celoti izpolnjuje zahteve zakonodaje EU.

Prvi korak v procesu zблиževanja je izdelati polno in natančno oceno zakonodajnih in upravnih "razhajanj", ki jih je treba odpraviti, da bi zagotovili skladnost. To oceno zakonodajnih razhajanj smo na našem ministrstvu, na področju okoljske zakonodaje, že opravili, in sicer z uporabo t.i. analitičnih tabel skladnosti. Evropa zahteva od bodočih članic zelo natančen pregled zakonodaje po posameznih smernicah in po posameznih členih. Na podlagi opravljenega dela bomo v grobem predstavili usklajenost naše zakonodaje z zahtevami smernic na področju industrijskega onesnaževanja z odpadnimi vodami ter z dejavnostjo, ki na ministrstvu trenutno poteka na tem področju, to je snovanje novih predpisov s področja odvajanja odpadnih vod.

Področje voda je v okoljski zakonodaji EU eno od najizčrpnije urejenih področij. Prva direktiva, ki ureja odvajanje odpadnih vod, je bila objavljena že leta 1976, to je okvirna direktiva o izpustih nevarnih snovi. Sledilo ji je sedem t.i. hčerinskih direktiv. Omeniti je potrebno tudi

direktivo IPPC, ki govori o celostnem preprečevanju in nadzoru onesnaževanja. Z vsemi naštetimi direktivami EU obvezuje svoje države članice, da z ustrežno zakonodajo poskrbijo za zaščito površinskih voda.

Direktiva 76/464/EEC - Izpusti nevarnih snovi (76/464/EEC - Council Directive of 4 May 1976 on pollution caused by certain dangerous substances discharged into the aquatic environment of the Community) je okvirna direktiva, ki zahteva odpravo ali zmanjšanje onesnaženja površinskih tekočih vod in obalnega morja z nekaterimi nevarnimi snovmi, ki so našteje v aneksu direktive in se delijo na dva seznama, na črno in sivo listo:

I seznam: nevarne snovi, zbrane na osnovi njihove strupenosti, obstojnosti in bioakumulacije, to so:

- halogenirani ogljikovodiki
- organofosforjeve spojine
- organokositrove spojine
- druge spojine, ki so dokazano strupene, kancerogene, teratogene ali mutagene
- živo srebro in njegove spojine
- kadmij in njegove spojine
- nerazgradljiva mineralna olja in ogljikovodiki naftnega izvora
- nerazgradljive sintetične snovi, ki so lažje ali težje od vode ali v vodi tvorijo suspenzije.

Seznam II: sestavljajo snovi, ki sicer škodljivo vplivajo na vodno okolje vendar pa je njihova škodljivost odvisna od značilnosti in lokacije vodotoka, v katerega se snovi

odvajajo. Vključuje naslednje snovi:

- kovine in njihove spojine, predvsem: Zn, Cu, Ni, Cr, Pb, Se, As, Sb, Mo, Ti, Sn, Ba, Be, B, U, V, Co, Ta, Te, Ag
- rastlinska zaščitna sredstva ter njihove spojine, ki niso vključena v prvi seznam
- strupene ali obstojne organske spojine silicija
- snovi z dokazljivo kvarnimi učinki na okus ali vonj proizvodov, ki so namenjeni za prehrano ljudi in so pridobljeni v vodnem okolju
- anorganske fosforjeve spojine ter elementaren fosfor
- razgradljiva mineralna olja in ogljikovodiki naftnega izvora
- fluoride in cianide
- snovi, ki škodljivo vplivajo na ravnovesje kisika v vodnem okolju, predvsem amonijak, nitriti.

Direktiva obvezuje, da države članice sprejmejo ukrepe za preprečevanje onesnaženja s snovmi s seznamom I in ukrepe za zmanjšanje onesnaženja s snovmi s seznamom II.

Osnovna zahteva vseh smernic je določitev emisijskih mejnih vrednosti za našete nevarne snovi. Država lahko določi tudi imisijske vrednosti za posamezne spojine, vendar se je večina držav članic odločila za emisijski pristop. Z uveljavitvijo IPPC - direktive o celostnem preprečevanju in nadzoru onesnaževanja pa bo obvezno predpisati oboje vrednosti.

Zaenkrat hčerinske direktive predpisujejo emisijske in imisijske vrednosti za 18 snovi iz prvega seznama. Za ostale snovi, katerih emisijske vrednosti niso postavljene na ravni

NATAŠA ŽITKO ŠTEMBERGER: Nove uredbe in harmonizacija

Skupnosti, naj bi bodoče članice upoštevale mejne emisijske vrednosti v drugih državah članicah EU. Predpisane pa so vrednosti za naslednje snovi:

Direktiva 82/176/EEC - Izpusti živega srebra (Council Directive on limit values and quality objectives for mercury discharges by the chlor-alkali electrolysis industry) se nanaša na izpuste živega srebra iz objektov za kloralkalno elektrolizo.

Direktiva 83/S 13/EEC - Izpusti kadmija (Council Directive on limit values and quality objectives for cadmium discharges) ureja izpuste kadmija iz objektov, ki izpuščajo kadmij (proizvodnja in predelava cinka, svinca, kadmija in ostalih neželeznih kovin, proizvodnja kadmijevih spojin, pigmentov in stabilizatorjev, proizvodnje baterij, galvanske obdelave materialov).

Direktiva 84/1 S6/EEC - Izpusti živega srebra (Council Directive on limit values and quality objectives for mercury discharges by sectors other than the chlor-alkali electrolysis industry) se nanaša na izpuste živega srebra iz ostalih objektov, ne kloralkalne elektrolize, to so predvsem industrije, ki uporabljajo Hg katalizatorje proizvodnje Hg katalizatorjev, proizvodnje organskih in anorganskih živosrebrinih spojin, proizvodnje baterij, v industriji neželeznih kovin, iz objektov za recikliranje nevarnih odpadkov, ki vsebujejo Hg.

Direktiva 84/491 /EEC - Izpusti heksaklorcikloheksana (Council Directive on limit values and quality objectives for discharges of hexachlorocyclohexane) določa mejne vrednosti za izpuste heksaklorocikloheksana oziroma njegove gama izomere, t.i. lindana, ki se uporablja kot rastlinsko zaščitno sredstvo - insekticid.

Direktiva 86/280/EEC - (Council Directive on limit values and quality objectives for discharges of certain dangerous substances included in List I of the Annex to Dir. 76/

464/EEC) se nanaša na ogljikov tetraklorid, DDT, insekticid in pesticid, pentaklorofenol, ki se uporablja kot rastlinsko zaščitno sredstvo v industriji usnja in tekstila kot dodatek barvam.

Direktivi 88/347/EEC (Council Directive amending Annex II to Dir. 86/280/EEC on limit values and quality objectives for discharges of certain dangerous substances included in List I of the Annex to Directive 76/464/EEC) in 90/415/EEC (Council Directive amending Annex II to Dir. 86/280/EEC on limit values and quality objectives for discharges of certain dangerous substances included in List I of the Annex to Directive 76/464/EEC) predpisujeta mejne vrednosti za naslednje snovi: aldrin, dieldrin, endrin, isodrin, vsi uporabni kot insekticidi, heksaklorobenzen, uporaben kot rastlinsko zaščitno sredstvo in v organski sintezi, heksaklorobutadien, kloroform, 1,2-dikloroetan, trikloretilen, triklorbenzen, tetrakloretilen.

Države članice morajo vzpostaviti obvezen monitoring tako odpadnih vod na posameznem izpustu kot površinskih voda. Monitoring identificira posamezne snovi v odpadnih vodah ter posledično v vodotokih in s tem pomaga pri vzpostavitvi

programov in ukrepov zmanjševanja onesnaževanja posameznega vodotoka. Obstoječ slovenski predpis, ki obstaja na tem področju, je pravilnik o prvih meritvah in obratovalnem monitoringu odpadnih vod ter o pogojih za njegovo izvajanje, ki zahteve smernic v zvezi z monitoringom odpadnih voda pokriva. Potrebni bodo manjši popravki, in sicer čas vzorčenja posameznih nevarnih snovi ter pogostost vzorčenja pri komunalnih čistilnih napravah, kot je razvidno iz spodnje tabele.

Države članice morajo vzpostaviti sistem dovoljenj ali pooblastil za izpuste snovi iz črne in sive liste v tekoče površinske vode, obalno morje ter če je potrebno, v kanalizacijo. Dovoljenje mora ob upoštevanju imisijskih vrednosti vsebovati maksimalne emisijske vrednosti, vsaj tako stroge, kot jih predpisuje EU v sedmih hčerinskih direktivah, in morajo biti izdane za določen čas. Direktiva zahteva, da se bodo vsa dovoljenja za izpust izdajala za največ 4 leta, in to le v primeru, da bo posamezen onesnaževalec dosegal predpisane emisijske vrednosti.

Ta zahteva pomeni predhodnico zahtev, ki jo predpisuje tudi IPPC direktiva. Namen te direktive je doseči

POGOSTOST MERITEV:

Komunalne vode 91/271/EEC	SLO predpis
2.000 PE - 10.000 PE	2.000 PE - 10.000 PE
12 vzorcev v prvem letu obratovanja 4 vzorci v naslednjih letih, če prvo leto vzorci ustrezajo predpisanim vrednostim, če eden presega vrednosti, drugo leto ponovno 12	4 vzorci letno
10.000 PE - 50.000 PE	10.000 PE - 50.000 PE
12 vzorcev	8 vzorcev letno
več kot 50.000 PE	več kot 50.000 PE
24 vzorcev	12 vzorcev letno

celostno preprečevanje in nadzor onesnaženja, in sicer z ukrepi za preprečitev oziroma zmanjšanje emisij iz industrijskih obratov v zrak, vode in zemljo, vključno z ukrepi v zvezi z odpadki, da bi dosegli visoko raven varstva okolja kot celote. Vse te dejavnosti bodo zahtevale začasno dovoljenje (skupno za vse vrste onesnaženja ali več dovoljenj za posamezno vrsto onesnaženja). Poleg tega smernica določa vrste industrijskih dejavnosti, za katere je obvezno predpisati mejne emisijske vrednosti.

Za snovi iz seznama II morajo države članice vzpostaviti programe za zmanjšanje onesnaženja z določenimi ciljnimimi imisijskimi vrednostmi in z določenimi roki izvajanja. Vsebinsko programov in rezultate izvajanja le-teh morajo članice posredovati Evropski komisiji.

Vzpostaviti je potrebno seznam vseh izpustov snovi s Seznama I. To pomeni, da mora pooblaščenca institucija letno zbirati podatke o tem, kateri vir onesnaževanja je odvajal posamezno nevarno snov ter koliko letno jo je izpustil.

Država članica mora vsaka tri leta poslati poročilo o implementaciji direktive Evropski skupnosti.

Omeniti je potrebno še direktivo, ki ureja odvajanje odpadnih vod iz urejenih naselij, to je komunalnih odpadnih vod (91/271/EEC Council Directive concerning urban waste water treatment). Ta direktiva obvezuje države članice, da predpišejo emisijske vrednosti tudi za industrijske dejavnosti, ki odvajajo biološko razgradljive odpadne vode, če se te ne odvajajo v kanalizacijski sistem, ki se zaključuje s čistilno napravo. To so naslednje dejavnosti :

- predelava mleka,
- predelava sadja in zelenjave,
- proizvodnja in polnjenje brezalkoholnih pijač,
- predelava krompirja,
- proizvodnja, predelava in konzerviranje mesa in mesnih

- izdelkov,
- proizvodnja piva,
- proizvodnja slada,
- proizvodnja alkoholnih pijač in alkohola,
- proizvodnja živalske krme iz industrijskih rastlin,
- proizvodnja kožnega in kostnega kleja in želatine,
- predelava rib.

To je bil pregled zahtev evropskih direktiv, ki jih bo morala Slovenija do natankosti prevzeti. Pregled obstoječih predpisov na področju odpadnih voda v Sloveniji pokaže, da je na tem področju že nekaj narejenega. Sistem določitve emisijskih vrednosti pri nas ima predvsem dve značilnosti:

- določitev vrednosti za posamezne parametre, ne za posamezne snovi (parametri zavzamejo lahko več snovi skupaj)
- določitev mejnih emisijskih vrednosti ter obveznih ukrepov po posameznih industrijskih panogah, kot to predvideva IPPC direktiva.

Obstoječi predpisi:

- Uredba o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadnih voda iz virov onesnaževanja (Uradni list RS, št. 35/96)
- Uredba o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadnih voda iz objektov in naprav za proizvodnjo, predelavo in obdelavo tekstilnih vlaken (Uradni list RS, št. 35/96)
- Uredba o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadnih voda iz objektov in naprav za proizvodnjo usnja in krzna (Uradni list RS, št. 35/96)
- Uredba o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadnih voda iz objektov in naprav za proizvodnjo kovinskih izdelkov (Uradni list RS, št. 35/96)
- Pravilnik o prvih meritvah in obratovalnem monitoringu odpadnih vod ter o pogojih za njegovo izvajanje (Uradni list RS, št. 35/96)

- Uredba o emisiji snovi pri odvajanju odpadnih vod iz komunalnih čistilnih naprav (Uradni list RS, št. 35/96)

Trenutno je v pripravi še nadaljnjih 12 posebnih predpisov, ki gredo v obravnavo na Gospodarsko zbornico Slovenije, nato pa v postopek sprejetja na vlado.

Skupna značilnost posebnih predpisov je, da predpisujejo:

- posebne ukrepe, ki jih je potrebno izvajati za zmanjšanje onesnaženja, ki ga povzroča posamezna dejavnost in
- mejne vrednosti parametrov, ki so značilni za posamezno panogo. Število parametrov je običajno manjše kot v splošni uredbi, vendar je to število obvezno za izvajanje meritev. Pooblaščenca izvajalec monitoringa v primeru, da ne obstaja za posamezno panogo posebni predpis, po lastni presoji določa obseg dodatnih parametrov. Prav tako so običajno mejne emisijske vrednosti za posamezen parameter višje, torej ugodnejše za posamezne onesnaževalce saj posamezne panoge ne morejo dosegati vrednosti iz splošne uredbe, kljub trenutno najboljši dostopni tehnologiji.

Predpisi v pripravi:

- Uredba o emisiji snovi pri odvajanju odpadnih vod iz objektov in naprav za proizvodnjo papirja, kartona in lepenke (Uradni list RS, št. 10/99)
- Uredba o emisiji snovi pri odvajanju odpadnih vod iz objektov in naprav za proizvodnjo celuloze (Uradni list RS, št. 10/99)
- Uredba o emisiji snovi pri odvajanju odpadnih vod iz objektov in naprav za pranje in kemično čiščenje tkanin
- Uredba o emisiji snovi pri odvajanju odpadnih vod iz kafilerij (Uradni list RS, št. 10/99)
- Uredba o emisiji snovi pri odvajanju odpadnih vod iz objektov in naprav za opravljanje zdravstvene in

veterinarske dejavnosti (Uradni list RS, št. 10/99)

- Uredba o emisiji snovi pri odvajaju odpadnih vod iz objektov in naprav za proizvodnjo rastlinskih in živalskih olj in maščob (Uradni list RS, št. 10/99)
- Uredba o emisiji snovi pri odvajaju odpadnih vod iz postaj za preskrbo motornih vozil z gorivi, objektov za vzdrževanje in popravila motornih vozil ter pralnic za motorna vozila (Uradni list RS, št. 10/99)
- Uredba o emisiji snovi pri odvajaju odpadnih vod iz objektov za živinorejo (Uradni list RS, št. 10/99)
- Uredba o emisiji snovi pri odvajaju odpadnih vod iz objektov in naprav za proizvodnjo stekla in steklenih izdelkov (Uradni list RS, št. 10/99)
- Uredba o emisiji snovi pri odvajaju odpadnih vod iz objektov in naprav za proizvodnjo piva in slada (Uradni list RS, št. 10/99)
- Uredba o emisiji snovi pri odvajaju odpadnih vod iz objektov in naprav za predelavo mleka in proizvodnjo

mlečnih izdelkov (Uradni list RS, št. 10/99)

- Uredba o emisiji snovi pri odvajaju odpadnih vod iz objektov za proizvodnjo, predelavo in konzerviranje mesa ter proizvodnjo mesnih izdelkov (Uradni list RS, št. 10/99)

Do sprejetja v EU bo potrebno objaviti še posebne predpise iz naslednjih industrijskih dejavnosti:

- rudarjenja in predelave rudnin,
- obdelave lesa, izdelave lesenih izdelkov in lesovinskih plošč,
- predelave goriv,
- iz objektov za oskrbo z energijo,
- predelave sadja ter zelenjave,
- proizvodnje alkoholnih pijač in alkohola,
- proizvodnje in polnjenja brezalkoholnih pijač,
- objektov za sušenje rastlinskih proizvodov za pripravo krmil,
- proizvodnje kožnega in kostnega kleja in želatine,
- proizvodnje ribjih izdelkov,
- kemijske in farmacevtske

industrije,

- proizvodnje in predelave kovin,
- proizvodnje izdelkov iz gume in plastičnih mas.

Vsekakor pa sprejetje predpisov s področja odpadnih voda ni dovolj za izboljšanje kakovosti slovenskih površinskih voda in tudi približevanje EU ne sme biti edini in poglavitni razlog za sprejemanje predpisov. Pomembno je seveda izvajanje in upoštevanje predpisov s strani onesnaževalcev. Vemo, da je celotna učinkovitost čiščenja odpadnih voda v Sloveniji relativno nizka, saj sekundarno in terciarno čiščenje na čistilni napravi ni ravno pogosto, in da naše vode še zdaleč niso čiste. Raziskave v Evropi kažejo, da so predpisane direktive prinesle izboljšanje kakovosti voda, saj je bila večina podjetij prisiljena vlagati v izboljšanje in optimizacijo tehnologije ter v čistilne naprave. Stanje se že izboljšuje tudi pri nas in upajmo, da se bo ta trend nadaljeval tudi v bodoče.



**tiskarna
tone tomšič d.d.**



**1000 LJUBLJANA, GREGORČIČEVA 25A
• 061/126 32 19 • FAX 061/218 646**

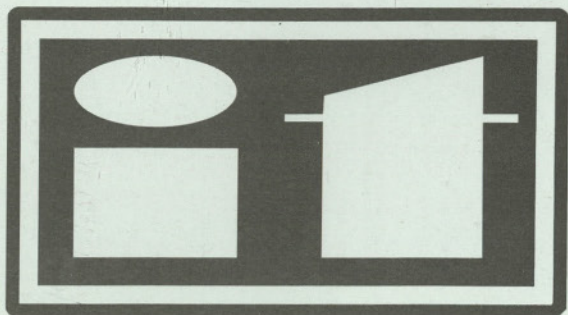
Cenjeni poslovni partnerji!

*Nudimo vam kvalitetne in hitre
usluge stavljenja, preloma,
ofsetnega tiska, knjigotiska
in različne vezave.*

Obiščite nas in se prepričajte!

*Nudimo kvalitetne izdelke po konkurenčnih
cenah.*

Izdelujemo vse vrste fotokopij in vezav.



STROKOVNI IZPITI ZA GRADBENIŠTVO IN ARHITEKTURO TER PRIPRAVLJALNI SEMINARJI ZA STROKOVNE IZPITE V LETU **1999**

Rok	Leto	A SEMINAR	B IZPIT	
			pisni	ustni
II.	1999	od 15. do 19. februar	13. februar	od 1. do 5. marec
III.	1999	od 15. do 19. marec	20. marec	od 6. do 9. april
IV.	1999	od 19. do 23. april	17. april	od 3. do 7. maj
V.	1999	od 17. do 21. maj	22. maj	od 7. do 11. junij
VI.	1999	od 20. do 24. september	16. oktober	od 2. do 5. november
VII.	1999	od 18. do 22. oktober	13. november	od 1. do 7. december
VIII.	1999	od 15. do 19. november		
IX.	1999	od 13. do 17. december		

A. Pripravljalne seminarje za strokovni izpit organizira Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (ZDGITS), 1000 Ljubljana, Karlovška 3 (Telefon/fax: 061/221-587), če 1 teden pred pričetkom seminarja prispe na naslov najmanj 20 pisnih prijav. Prijava naj bo v obliki dopisa, iz katerega je razvidno: ime, priimek, zadnja strok. izobrazba, naslov udeleženca ter rok seminarja in naslov plačnika seminarja. Samoplačnik mora k prijavi priložiti kopijo dokazila o plačilu. Cena seminarja znaša 65.000,00 SIT.

B. Strokovni izpiti potekajo pri inženirski zbornici Slovenije (IZS), 1000 Ljubljana, Dunajska 104 (telefon: 061 168-57-16; 168-46-71. Informacije dobite po telefonu od 10.00 do 12.00 ure pri ga. Terezi Rebernik. Cena izpita znaša 70.000,00 SIT.