

KNJIŽNICA FGG

J R
GRADBENI vestnik
1996

UNIVERZA V LJUBLJANI



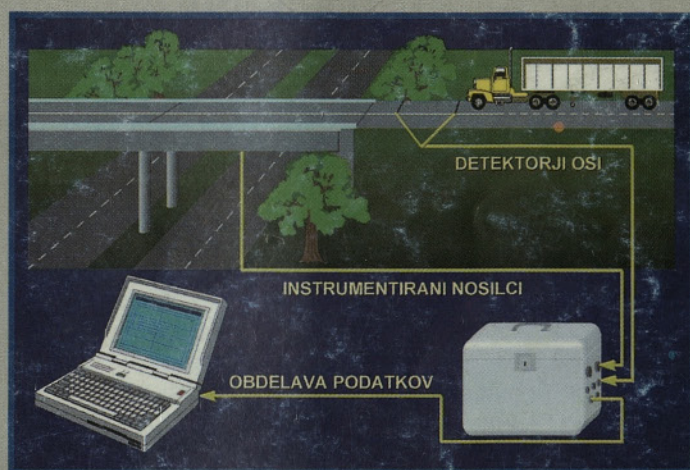
119960037,8/10

CODISS 0

LJUBLJANA, AVGUST-SEPTEMBER-OKTOBER, 1996 • LETNIK XXXXV • STR.: 163-230

GRADBENI VESTNIK 8-9-10

1996



ZAG Ljubljana

Zavod za gradbeništvo Slovenije

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
v LJUBLJANI

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

Letno izide 12 števil. Individualni naročniki plačajo letno naročnino v višini 2.300 SIT, študentje in upokojenci 1.150 SIT. Gospodarske organizacije in podjetja plačajo letno naročnino za 1 izvod revije 28.350 SIT. Naročnina za naročnike v tujini znaša 100 US \$.

Po mnenju Ministrstva RS za kulturo je v ceno vključen 5 % prometni davek.

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

GRADBENI VESTNIK

GLASILO ZVEZE DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE
ŠT. 8-9-10 • LETNIK 45 • 1996 • ISSN 0017-2774

VSEBINA-CONTENTS

Predgovor
Foreword

Miha Tomaževič:

PREDGOVOR 164

Jaš Žnidarič:

PREDGOVOR 168

Poročila – Informacije
Reports – Information

Jaš Žnidarič:

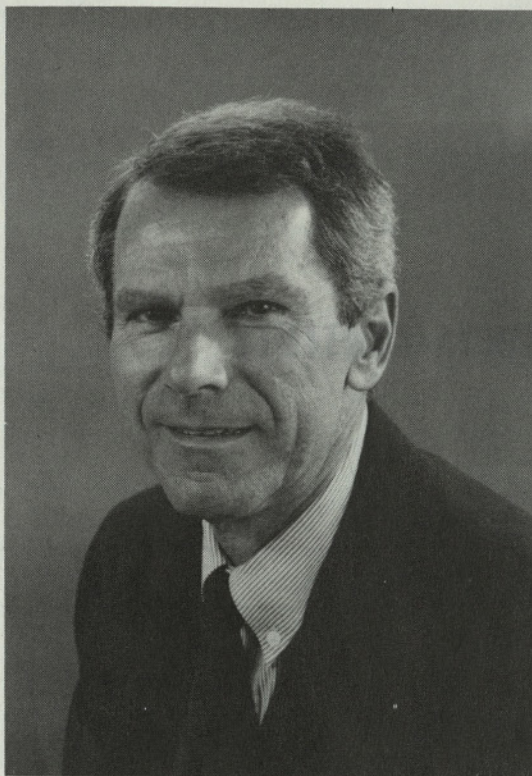
TRAJNOST ARMIRANOBETONSKIH KONSTRUKCIJ 171
DURABILITY OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Iztok Peruš, Lojze Bevc, Jaš Žnidarič:

NOV PRISTOP PRI REŠEVANJU PROBLEMOV UPRAVLJANJA IN VZDRŽEVA-
NJA CESTNIH MOSTOV 212
NEW APPROACH TO THE PROBLEMS OF BRIDGE MANAGEMENT

Aleš Žnidarič:

KONTROLA VARNOSTI OBSTOJEČIH MOSTOV 223
CONTROLLING THE SAFETY OF EXISTING BRIDGES



ky

Številko, ki je pred vami, so pripravili sodelavci Zavoda za gradbeništvo Slovenije, inštituta, ki ga je 21.4.1994 s sklepom o preoblikovanju dela bivšega Zavoda za raziskavo materiala in konstrukcij v javni raziskovalni zavod ustanovila vlada Republike Slovenije. Z vpisom v sodni register je bila ustanovitev ZAG Ljubljana, kot se novi zavod s skrajšanim imenom imenuje, dne 17. 3. 1995 tudi formalno potrjena.

Zavod ima sicer novo ime, katerega kratica ZAG se je, upamo, doma in v tujini že udomačila, vendar skoraj petdesetletno tradicijo. Leta 1949 je vlada takratne Ljudske republike Slovenije ustanovila Gradbeni inštitut s takorekoč dobesedno enakimi nalogami, kot jih je vlada sedanje države naložila Zavodu za gradbeništvo Slovenije. Ko je bila leta 1952 zgrajena in opremljena stavba na Dimičevi 12, je vlada Gradbeni inštitut preimenovala v Zavod za raziskavo materiala in konstrukcij (ZRMK), in ga proglasila za go-

This issue of Slovenia's Journal of Civil Engineering has been prepared by members of staff of the Slovenian National Building and Civil Engineering Institute (ZAG Ljubljana). The Institute was founded by a decree, promulgated by the Government of the Republic of Slovenia on April 21st, 1994, about the reorganization of part of the former Institute for Testing and Research in Materials and Structures (ZRMK) into a public research institute. ZAG Ljubljana was entered into Slovenia's official List of Companies on March 17th, 1995.

Although today's institute bears a new name, the abbreviation of which (ZAG) has already become familiar among clients and institutional circles at home and abroad, it has an almost fifty years long tradition. Namely, it was in 1949 that the Government of the then People's Republic of Slovenia founded a Civil Engineering Institute with literally the same tasks as those which have been entrusted to ZAG by the Government of the independent country of today. When one of the present



spodarsko ustanovo s samostojnim financiranjem. Tržno usmerjene dejavnosti, ki so bivšemu ZRMK dolga leta zagotavljale obstoj, so bile nezdružljive z zahtevami Evropske direktive 89/106/EEC za preskušanje in certificiranje gradbenih proizvodov. Zato je bil ZRMK na poti Slovenije v Evropsko unijo primoran preoblikovati se v javni raziskovalni zavod ZAG Ljubljana, ki izpolnjuje vse zahteve omenjene evropske direktive, in razvojno-raziskovalno podjetje Gradbeni inštitut ZRMK, ki je prevzelo tržno usmerjene dejavnosti bivšega ZRMK, in bo po lastninjenju postalo gospodarska družba. ZAG je od bivšega ZRMK prevzel praktično vse laboratorije, s preskuševalno in raziskovalno opremo vred, prevzel pa je tudi eno največjih knjižnic s strokovno literaturo v Sloveniji. Storitve laboratorijev in knjižnice danes s posebnim sporazumom nudi tudi Gradbenemu inštitutu ZRMK.

ZAG Ljubljana je neodvisna, neprofitna in nepristranska institucija, katere dejavnosti lahko razdelimo na tri glavna področja:

- raziskovalno in predkonkurenčno razvojno dejavnost,
- preskušanje in potrjevanje kakovosti in skladnosti ter certificiranje v gradbeništvu,
- izdelavo tehničnih ekspertiz in analiz.

Po sklepu vlade opravlja Zavod za gradbeništvo Slovenije svoje dejavnosti "kot osrednja slovenska institucija za gradbeništvo". Zato ga je vlada pred kratkim preimenovala v Zavod za gradbeništvo Slovenije, s čimer je njegova osrednja vloga v slovenskem gradbeništvu potrjena tudi z imenom.

Zavod je organizacijsko razdeljen na štiri oddelke (oddelek za materiale, oddelek za gradbeno fiziko, oddelek za konstrukcije in oddelek za geotehniko in prometnice), ki imajo v svojem sestavu 24 laboratorijev in odsekov, ki pokrivajo praktično celotno dejavnost gradbeništva. Kot posebni enoti delujeta še Laboratorij za metrologijo in Certifikacijska služba. Zavodovi laboratoriji so za izvajanje preskušanja v okviru obveznega certificiranja že pridobili akreditacijske listine Urada za standardizacijo in meroslovje pri Ministrstvu za znanost in tehnologijo, priprav-

buildings at the location of Dimičeva 12 had been built, in 1952, the governmental Civil Engineering Institute became an independent public entity called the Institute for Testing and Research in Materials and Structures (ZRMK). Many of the market-oriented activities which had for many years ensured the existence of the former ZRMK were not in compliance with the requirements of the EEC Council Directive No.89/106 regarding approval bodies for the attestation of conformity and certification of construction products. Thus, as Slovenia approached closer to the European Union, the reorganization of ZRMK became inevitable. Two fully independent entities resulted from this reorganization, a process which lasted for several years: ZAG, a governmental, public research institute, which fulfils the requirements of the European Directive, and a market-oriented, R&D enterprise, known as the Civil Engineering Institute (Gradbeni inštitut ZRMK - GI), which is soon to become a private enterprise. Practically all of the testing and research laboratories of the former ZRMK have been incorporated into ZAG, as well as one of the largest technical libraries in Slovenia. According to a special agreement, the services of these laboratories and of the library are also available to GI.

ZAG Ljubljana, is an independent, impartial and non-profit organization, with the following main activities:

- fundamental and applied research,
- testing for attestation of conformity and certification of construction products,
- preparation of expert opinions and technical analyses.

As stated in the governmental decree, ZAG performs its activities as the "main Slovenian institution in the field of building and civil engineering". Recently, the Government approved our proposal that ZAG's full name be changed to the Slovenian National Building and Civil Engineering Institute, thus confirming ZAG's vital role in Slovenian building and civil engineering.

ZAG is presently divided into four departments (the Department for Materials, the Department for Building Physics, the Department for Structures, and the Department for Geotechnics and Traffic Infrastructure), with 24 laboratories and sections, covering practically all construction activities. The Laboratory for Metrology and the Certification Body act as special units. ZAG's laboratories have been accredited by the Standards and Metrology Institute of the Ministry of Science and

ljajo pa se tudi na pridobitev akreditacije za vsa preskušanja, ki jih izvajajo.

Na Zavodu je ta čas 170 zaposlenih: med njimi je 74 sodelavcev z višjo ali visokošolsko izobrazbo, od tega 6 z doktoratom znanosti in 17 z magisterijem. Visoka strokovnost zaposlenih in skrb za posodabljanje opreme v sicer dobro opremljenih laboratorijih, ki so po preoblikovanju ZRMK praktično v celoti prešli v ZAG, so zagotovilo, da so na vseh področjih dejavnosti ZAG-ove storitve po kakovosti mednarodno primerljive. Kljub temu, da so strokovnjaki ZAG razmeroma mlad kolektiv, saj povprečje njihove delovne dobe ne presega 15 let!

V obdobju preoblikovanja bivšega ZRMK, pa tudi še danes, je bila osnovna skrb Zavoda za gradbeništvo Slovenije posvečena vzpostavitvi evropsko primerljivega sistema potrjevanja kakovosti in certificiranja v gradbeništvo. Kljub drugačnim pogledom nekaterih odločilnih krogov in državnih institucij na začetku upamo, da so zavodovi strokovnjaki s trdnimi argumenti in primeri iz vsakdanje prakse uspeli dokazati, da na reguliranem področju, kot je gradbeništvo, kakovosti materialov in ustreznosti postopkov gradnje ne moremo prepustiti stihiji na trgu. Veliko zaslug za to ima tudi odločitev DARS, Družbe za avtoceste v Republiki Sloveniji, ki je takoj, ko je bil objavljen sklep vlade o preoblikovanju ZRMK, na podlagi programa, ki ga je zanj pripravil, s pogodbo pooblastila bodoči Zavod za gradbeništvo Slovenije, da kot neodvisna, neprofitna in nepristranska institucija izvaja potrjevanje ustreznosti gradbenih proizvodov in del pri gradnji avtocest. S to odločitvijo je DARS v nacionalni program izgradnje avtocest vpeljala evropsko primerljivi sistem potrjevanja in certificiranja, prepričani pa smo, da je ZAG v dveh letih izvajanja potrjevanja ustreznosti svojo vlogo v avtocestnem programu tudi v celoti opravičil. Evropska direktiva je posredno dobila polno veljavo, še posebej potem, ko je Slovenija postala pridružena članica Evropske unije.

V naslednjem petletnem obdobju, ko se bo Slovenija priključevala EU, bodo naše aktivnosti usmerjene v priznavanje ZAG kot slo-

Technology for the carrying out of tests of products which are subject to obligatory certification. Hopefully, ZAG's laboratories will soon be accredited to carry out tests within the complete scope of their activities.

Out of 170 employees, there are 74 experts with university education, among them 6 having a doctoral, and 17 a master's degree. The high professional level of ZAG's experts, and continuous efforts for the modernization of testing facilities in already relatively well equipped laboratories, provide a guarantee that ZAG's activities remain at an internationally comparable level of quality. ZAG's experts represent a relatively young team, whose average work experience does not exceed 15 years.

Within the period of reorganization of the former ZRMK, and so is still the case today, the basic aim of the National Building and Civil Engineering Institute has been oriented towards the establishment, in Slovenia, of a European system for the attestation of conformity and certification of construction products. Despite different views held by some important governmental bodies over Slovenia's first years of independence, ZAG's experts have – hopefully – succeeded in convincing these bodies that in a regulated field of the economy, such as building and civil engineering, the quality of materials, products and procedures cannot be left to free choice in the market. In this regard, the decision by DARS (the Society for Motorways in the Republic of Slovenia) was extremely important. It was, namely, on the basis of a program prepared by ZAG, that DARS gave ZAG the mandate to carry out attestation of conformity and certification of construction products and works within the national program of construction of motorways in Slovenia, this mandate being given as soon as the Government of Slovenia had issued the above-mentioned decree of 1994, by means of which part of ZRMK became an independent, impartial and non-profit institution. Through this decision made by DARS, a European system for the attestation of conformity and certification of construction products was introduced into the national program of construction of motorways in Slovenia. We are convinced that, over the two years of existence of this program, ZAG has fully confirmed its role and strengthened its position as Slovenia's central institution in the fields of building and civil engineering.

During the next five-year period of the closer linking of Slovenia to the European Union, our activities will be oriented towards the

venske nacionalne gradbene institucije za potrjevanje kakovosti in certificiranje v gradbeništvu v državah EU. ZAG je že podpisal sporazume o medsebojnem priznavanju preiskav z nekaterimi sorodnimi inštituti v Italiji in Španiji, z nekaterimi pa se še dogovarjamo. ZAG je že pridružen član FEHRL, foruma evropskih nacionalnih laboratorijev za raziskave v cestogradnji, njegov laboratorij za keramiko pa je član CERLAB, evropskega združenja laboratorijev za keramiko. Čimprej bo moral skleniti tudi sporazum o pridruženem članstvu z ENBRI, evropskim združenjem nacionalnih inštitutov za raziskave v gradbeništvu.

Seveda pa ZAG ne zanemara raziskovalne dejavnosti, saj se zaveda, da brez poglobljenega znanja ni kakovostnega potrjevanja in ekspertiz. Če bo po letošnjem planu blizu 45 % celotnega prihodka slonelo na potrjevanju kakovosti in certificiranju, predvidevamo, da bo obseg pritoka sredstev iz raziskovalne dejavnosti za MZT ter druga ministrstva in naročnikove znašal približno 20 %. Med raziskovalnimi projekti, ki jih izvaja, oziroma jih bo ZAG začel izvajati letos, je tudi 12 mednarodnih projektov: 8 projektov COST, po en projekt iz programov COPERNICUS, EUREKA, PHARE in SHRP-LTPP ter po en slovensko-ameriški, slovensko-nemški, slovensko-kitajski in slovensko-makedonski znanstveno raziskovalni projekt. V okviru 4. programa znanstveno-raziskovalnega in razvojnega dela Evropske zveze za obdobje 1994–98 je bilo sprejeto sodelovanje ZAG v projektih ARROWS, PARIS in WAVE. Kot javni raziskovalni zavod, ki deluje na področju gradbeništva, se ZAG z ustreznimi ministrstvi dogovarja za izkoriščanje svojih raziskovalnih kapacitet za usmerjene raziskave za potrebe ministrstev v okviru njihovih srednjeročnih programov.

Če naj bi ZAG predstavljal osrednjo slovensko institucijo za gradbeništvo, si te vloge ne moremo predstavljati brez njegove tesne povezanosti z obema slovenskima Univerzama, predvsem z njunima gradbenima fakultetama. Tako na področju raziskovalne dejavnosti, kjer laboratoriji ZAG lahko predstavljajo instrumentalni center, po velikosti in opremljenosti edinstven v Sloveniji, kot tudi na področju zakonodaje in tehnične regulative, ter

recognition of ZAG, in the member countries of the EU, as Slovenia's national institute for the attestation of conformity and certification of construction products. ZAG has already signed agreements about the mutual recognition of test reports with similar institutes in Italy and Spain. Further agreements are being negotiated. As the Slovenian national institute, ZAG is an associate member of FEHRL, the Forum of European National Highway Research Laboratories, and ZAG's Laboratory for Ceramics and Refractory Materials is a member of CERLABS, the European Network of National Ceramic Laboratories. ZAG is also planning to become a member of ENBRI, the Association of European National Building Research Institutes, in the near future.

Fundamental and applied research represent an important part of ZAG's activities, and strong emphasis has been placed, in ZAG's development policy, on the continuous education of staff and the improvement of research facilities. Without adequate research support it would not be possible for ZAG to maintain its leading role in the attestation of conformity and certification, and in the provision of expert opinions and technical analyses at the national level. According to provisional financial plans, 45 % of the turnover in 1996 will be the result of tests for the attestation of conformity and certification. However, more than 20 % will be the result of research financed by the Ministry of Science and Technology, as well as by other Ministries and governmental bodies. Among present research projects, 12 are at an international level: 8 projects are within the COST program, and one each within the COPERNICUS, EUREKA, PHARE and SHRP-LTPP programs, respectively. There are also joint US-Slovenian, German-Slovenian, Chinese-Slovenian and Macedonian-Slovenian scientific projects. Within the 4th Framework Programme for Research and Technological Development 1994–98, ZAG is cooperating in the ARROWS, PARIS and WAVE projects. As a public research institute, ZAG is discussing the possibility of being included, on a long- and short-term basis, in object-oriented research for the needs of the ministries and other governmental bodies related to building and civil engineering.

While maintaining its role as the central Slovenian building and civil engineering institute, ZAG is firmly connected to both of Slovenia's universities, and especially with their faculties of civil engineering. Both in the field of research and education, where the laboratories of ZAG, which represent an instrumental

pri vzpostavljanju sistema potrjevanja kakovosti in certificiranja v gradbeništvu, je sodelovanje med obema Univerzama in ZAG v nacionalnem interesu.

Ravno tako je delovanje ZAG povezano z vsemi ostalimi inštitucijami in laboratoriji, ki delujejo na področju gradbeništva. Racionalna izraba in razporeditev razmeroma majhnih slovenskih kapacitet v raziskovalni sferi in v sistemu potrjevanja kakovosti in certificiranja v gradbeništvu mora temeljiti na medsebojnem zaupanju in priznavanju vseh sodelujočih subjektov. Upamo, da bo ZAG tudi pri tem uspešno odigral vlogo osrednje slovenske inštitucije.

Miha Tomaževič, direktor

center, unique in Slovenia according to its size and facilities, that can be used by interested partners, and in the field of technical legislation and the establishment in Slovenia of a European system for the attestation of conformity and certification of construction products, close cooperation between ZAG and these two Universities is vitally needed, and in accordance with national interests.

The activities of ZAG are also well connected with the activities of other institutions, laboratories and companies working in the fields of building and civil engineering. Rational use and distribution of the relatively small Slovenian research and testing capacities should be based upon the mutual confidence and respect of all participating parties, as well as on the rules established in a European-comparable system for the attestation of conformity and certification of construction products. We hope that ZAG will play a central role in this process, too.

Miha Tomaževič, Director

PREDGOVOR

PREFACE

V zadnjih dveh desetletjih pogosto ugotovljena nezadostna trajnost betonskih konstrukcij je vodila k poglobljenim in intenzivnim raziskavam vzrokov in narave procesov razpadanja betona, razvile pa so se tudi strategije za obvladovanje teh problemov. Vse osebe, ki sodelujejo pri nastajanju in uporabi betonskih konstrukcij naj bi vsaj malo razumele najpomembnejše procese propadanja in poznale z njimi povezane odločujoče parametre. Pri zagotavljanju trajnosti je to temeljno znanje v veliko primerih predpogoj za sprejemanje pravih odločitev ob pravem času.

Concern in the last two decades with the occasionally inadequate durability of concrete structures has led to intensified research into the causes and nature of degradation processes, and to the development of strategies for handling such situations. All persons involved in the creation and use of concrete structures should have the minimum understanding of the most important deterioration processes and their governing parameters. In many cases such basic knowledge is the precondition for taking correct decisions at the right time when seeking the required

Za inženirja, ki ugotavlja stanje obstoječih konstrukcij, pa je potrebna še večja strokovna usposobljenost.

V tej številki so trije prispevki, ki obravnavajo trajnost betonskih konstrukcij, in nekatere sedanje raziskave ZAG, ki so povezane z ugotavljanjem trajnosti, varnosti in splošne ustreznosti obstoječih, večinoma poškodovanih mostov.

Prvi prispevek poskuša sintetizirati temeljno tehnično znanje in sedanje inženirske izkušnje o trajnostih karakteristikah betona in betonskih konstrukcij in posredovati konstruktorjem teoretične osnove ter praktične smernice za projektiranje novih, trajnih konstrukcij, kakor tudi za ugotavljanje trenutnega stanja obstoječih, poškodovanih konstrukcij. Predstavljeni so tradicionalno zagotavljanje trajnosti na podlagi najnovejših tehničnih pravil in smernic, in pa sodobnejše alternativne metode za napoved življenjske dobe. Trajnosti betonske konstrukcije seveda ni mogoče doseči le z izboljšanjem karakteristik samega betona, ampak so pri tem pomembni tudi arhitektonsko in konstrukcijsko oblikovanje, uporaba pravih tehnoloških postopkov pri gradnji, nadzorstvo med uporabo in preventivno vzdrževanje.

V zadnjih nekaj letih so na ZAG potekale raziskave v zvezi z ugotavljanjem realnega stanja obstoječih mostov z vidika trajnosti in varnosti. Izdelati je bilo treba metodologijo za pridobitev po možnosti kvantificiranih podatkov o stanju poškodovane konstrukcije, kakršne potrebuje upravitelj konstrukcije pri sprejemanju odločitev o nadaljnjih ukrepih.

V okviru raziskovalnih projektov so bile zasnovane metode za klasifikacijo poškodb in kategorizacijo poškodovanih konstrukcij, kakor tudi za določanje raznih parametrov, ki kvantificirajo poškodovanost mostu in njegovo obnašanje. Ti parametri so: rating stanja, ki izraža stopnjo poškodovanosti, varnostni indeks in rating faktor, ki določata varnostno stopnjo konstrukcije, in rating ustreznosti, s katerim se oceni splošna primerenost mostu. Za določitev teh parametrov se uporabljajo podatki detailnega pregleda in rezultati preiskav na konstrukciji.

durability. The professional requirements for the assessing engineer go far beyond the requirements for an ordinary structural engineer.

This volume contains three papers dealing with the durability of reinforced concrete structures and with some of the present research and development activities in our National Building and Civil engineering Institute ZAG, which are related to the assessment of the durability, safety and general adequacy of existing deteriorated bridges.

The first paper attempts to synthesize basic technical knowledge and current engineering experience regarding the durability characteristics of concrete and concrete structures and give to the construction engineer the theoretical background and practical guide for the durability design of new structures, as well as for the assessment of the actual condition of existing deteriorated structures, which in certain cases can be expressed as remaining service life. Traditional assurance of durability based on updated technical rules and guidelines, and advanced alternative methods for the prediction of service life are presented. The improved performance of structures exposed to severe environments cannot be achieved by improving the material characteristics alone, but must include also the elements of architectural and structural design, proper methods of execution, inspection and preventive maintenance.

In the last couple of years the research activities at ZAG have focussed on the assessment of existing concrete bridges. The need for a systematic approach to the realistic assessment of existing structures regarding their durability and/or safety is namely evident. It should provide possibly quantitative information about the condition of a deteriorated structure which the owner of the structure would need when he has to take the decision about necessary further actions.

Within the research project methods for the classification of types of damage and categorisation of deteriorated structures, as well as for determining of different parameters quantifying the bridge condition and performance have been developed. These parameters are the condition rating expressing the degree of deterioration, the safety index and rating factor indicating the safety level, and the adequacy rating by which the overall sufficiency of a bridge structure can be evaluated. They can be determined by data of the in-depth inspection and in-situ testing.

V naslednjem prispevku je prikazana uspešna uporaba nevronske mreže pri določanju kategorije poškodovanosti in ratinga ustreznosti. Oba parametra sta namreč kombinirani vrednosti več neodvisnih spremenljivk, ta metoda pa je zelo primerna za reševanje večparametričnih problemov. Tretje možno področje uporabe nevronske mreže je modeliranje prodiranja kloridov v nestacionarnih okoliščinah, npr. pri delovanju talilnih soli na zelo izpostavljene elemente mostu.

Zadnji prispevek podrobno obravnava ocenjevanje realne varnosti mostov, z upoštevanjem dejanske nosilnosti kritičnih prerezov, ugotovljene v okviru detajlnega pregleda, in dejanske maksimalne obtežbe, ki se meri z metodo tehtanja vozila med vožnjo čez most (Bridge-weigh-in-motion), modelira pa s postopkom simulacije.

Jaš Žnidarič

The following paper shows the successful application of the neural network-like method for determination of the deterioration category and of the adequacy rating. Both parameters are namely combined values derived from a number of independent variables, and this method seems to be the most appropriate for solving multi-parametric problems. The third possible application of the neural networks could be in modelling the depth of ingress of chloride ions in relation to time in non-stationary environmental conditions, appearing e.g. in the case of deicing salts in very exposed bridge elements.

The last paper discusses in detail the evaluation of the actual safety of bridge structures, by taking into account the true bearing capacity of critical sections as assessed by the in-depth inspection, and the actual maximum loads as measured by the Bridge-weigh-in-motion system and modelled by a simulation procedure.

TRAJNOST ARMIRANOBETONSKIH KONSTRUKCIJ

Durability of reinforced concrete structures

UDK 691.3 + 69.059.4

JAŠ ŽNIDARIČ

POVZETEK

V I. delu je podan pregled stanja stroke pri projektiranju in zagotavljanju trajnosti konstrukcij iz armiranega in prednapetega betona.

Obdelani so najpomembnejši agresivni vplivi na beton: mehanski, fizikalni, kemični in elektrokemični ter biološki. Opisani so glavni fizikalni procesi, ki omogočajo penetracijo agresivnih tekočin in plinov v porozno strukturo cementnega kamna (difuzija, vpijanje in tečenje pod pritiskom), kakor tudi transportni mehanizmi vlage iz naravnega okolja. Med agresivnimi vplivi je namenjena posebna pozornost najbolj pogostim vzrokom poškodb na betonskih konstrukcijah, t.j. koroziji armature in zmrzovanju-odtaljevanju betona.

Za projektiranje trajnosti sta na razpolago dva pristopa: tradicionalni, ki temelji predvsem na izkustvu, in alternativni, ki za izražanje odpornosti betona na posamezne agresivne vplive uporablja matematične modele. Zagotavljanje trajnosti s tradicionalnim modelom sloni na predpisih in navodilih za debelino zaščitnega sloja nad armaturo, za sestavo betona pri določeni stopnji izpostavljenosti betonske konstrukcije, za oblikovanje konstrukcijskih elementov in za dodatne in posebne zaščitne ukrepe. S tega področja so predstavljene najnovejše smernice iz osnutka evropskega standarda prEN 206.

Alternativni pristop pri projektiranju trajnosti vključuje: a) empirične obrazce, ki predstavljajo prehod od tradicionalnega k inženirskemu obravnavanju trajnosti, b) fizične modele za simuliranje konkretnih problemov in c) matematične modele delovanja agresivnih vplivov na beton. Ker je korozija armature prevladujoči vzrok za večino poškodb na betonskih konstrukcijah, se največ pozornosti namenja modelom za napredovanje karbonatizacije in prodiranje kloridov, ki so tudi opisani. Z njimi se oceni čas do depasivacije armature, t.i. začetno fazo procesa korozije, ki se tudi šteje za projektirano življenjsko dobo, medtem ko se pri ocenjevanju preostale življenjske dobe obstoječih konstrukcij običajno upošteva tudi primerni del faze širjenja aktivne korozije.

V II. delu so prikazani postopki ugotavljanja stanja obstoječih betonskih konstrukcij in ocenjevanje ustreznosti cestnih mostov v Sloveniji. Stanje in zanesljivost obstoječih betonskih konstrukcij se ugotavlja po potrebi ali sistemsko, kot npr. sestavni del upravljanja z mostovi. Cilji ugotavljanja so določitev stopnje ali kategorije poškodovanosti, določitev resnične nosilnosti kritičnih prerezov za oceno varnosti konstrukcije, ocena preostale življenjske dobe in/ali določitev jakosti in obsega poškodb za izdelavo projekta sanacije. Ugotavljanje stanja običajno sestoji iz pregleda konstrukcije, ki mu glede na namen ocene in po potrebi sledi izvedba preiskav za pridobitev potrebnih podatkov. Podan je pregled uporabnosti najprimernejših, večinoma neporušnih preiskav lastnosti in strukture betona ter položaja in stanja armature, kakor tudi mednarodno usklajenih kriterijev za oceno kakovosti betona in armature na podlagi rezultatov teh preiskav. Kriteriji se koristno uporabljajo za kvantificirano kategorizacijo objektov glede na stopnjo poškodovanosti. Določitev kategorije poškodovanosti objekta oz. razdelitev večjega objekta na predvidene kategorije poškodovanosti je podlaga za prvo grobo oceno stroškov sanacije, in za oceno preostale življenjske dobe objekta ali njegovih delov.

Avtor:

Jaš Žnidarič, dipl.inž.gradb., Zavod za gradbeništvo – ZRMK, Dimičeva 12, Ljubljana

Na koncu je prikazan sistem pregledovanja in ocenjevanja stanja mostov v Sloveniji, ki smo ga razvili pred nekaj leti za potrebe cestne uprave in kazalci stanja mostov, ki se uporabljajo za ocenjevanje njihove ustreznosti. Ta vsebuje določitev neodvisnih parametrov stanja in obnašanja mostne konstrukcije. To so rating poškodovanosti, varnostni indeks oz. rating faktor za oceno dejanske varnosti, preostala življenjska doba in funkcionalnost mostu v cestni mreži. Za celovito presojo ustreznosti mostu je nujno te parametre združiti v eno samo vrednost, ki se imenuje rating ustreznosti. Razvita je bila metoda z uporabo nevronske mreže, ki temelji na neparametrični večdimenzionalni regresiji. Primerna je tudi za kvantificirano kategorizacijo poškodovanih območij na betonskih konstrukcijah.

DURABILITY OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

S U M M A R Y

In the first part, the state-of-the-art in the field of the design and the assurance of the durability of reinforced and prestressed concrete structures is presented. The most significant aggressive actions on concrete are discussed: mechanical, physical, chemical and electrochemical, and biological. The main physical processes controlling the penetration of aggressive water solutions and gases into the porous cement paste structure (diffusion, absorption and flow), as well as the transport mechanisms of water and moisture from the surrounding environment, are described. Special attention is given to the most frequent causes of deterioration i.e. reinforcement corrosion and frost action.

Two approaches for the design of durability are now possible and available: the traditional approach based on long-term experience, and the alternative approach, applying mathematical modelling of aggressive actions and of the resistance of concrete to various deterioration mechanisms. The traditional assurance of durability comprises the rules and guidelines for the minimum depth of concrete cover, the composition of concrete for each exposure class, the detailing of structural elements and the application of special protective measures. The rules for the durability design specified by the new preliminary European standard prEN 206 are presented.

The alternative methods in durability design include a) empirical mathematical expressions, which represent the transition from the first to the second approach, b) methods based on proven tests, simulating performance of concrete in actual conditions, and c) methods based on analytical models, which have been calibrated against test data representing the aggressive conditions. As reinforcement corrosion appears to be the prevailing cause for concrete deterioration, the main attention is given to analytical models describing the progress of carbonation and the penetration of chlorides, which are also included in this report. They are basically used for the estimation of duration of the initiation phase, when the depassivation of the reinforcement is reached. This period of time is usually considered to be the design service life, while the remaining service life of existing structures can be reasonably extended into the propagation phase of corrosion.

The second part deals with the methods for the assessment of the condition of existing concrete structures and for the appraisal and rating of the adequacy of road bridges in Slovenia. The condition and the reliability of existing concrete structures is assessed either if so required by the owner, or systematically e.g. as part of the bridge management system. The goals of the assessment of a structure are: condition rating or condition categorisation, determination of the true load carrying capacity of critical sections needed for the evaluation of structural safety, estimation of the remaining service life and/or determination of the degree and extent of damages needed for the design and estimation of repair works. The assessment includes inspection of the structure, which is usually followed by in-situ testing to provide the necessary data for the planned objective of the assessment. A survey of available, mostly non-destructive testing methods to examine the properties and the structure of concrete, as well as the position and condition of reinforcing steel, together with the related internationally accepted criteria for the appraisal of the quality of built-in concrete and reinforcement is given. These testing methods and the relative criteria are used to classify the detected damage and to categorise the degraded areas on structural members. Such quantitative categorisation of a structure or of its portions with the same degree of deterioration is a tool for the evaluation of the remaining service life of individual parts of the structure, as well as for the first rough estimation of repair costs.

In conclusion, the system of inspection and assessment of bridges which has been developed to comply with the needs of the Slovenian road authority is presented. It includes the determination of independent parameters indicating the performance of a bridge structure: the condition rating, the safety index or the rating factor to estimate the structural safety, the remaining service life and the functionality of the bridge

in the road network. To judge the overall adequacy of a bridge these parameters should be transformed into one single value called the adequacy rating. A procedure to determine this rating value has been developed by applying a general statistical approach known as the neural network-like method, based upon non-parametric multidimensional regression. A similar procedure has been applied to the quantitative categorisation of degraded areas on concrete structures.

I. DEL: TEORETIČNE OSNOVE IN ZAGOTAVLJANJE TRAJNOSTI

UVOD

Splošno

Beton je do nedavno veljal za trajno gradivo, ki ga je potrebno le minimalno vzdrževati. Sedaj pa na objektih v mestnem in industrijskem okolju, zlasti pa na mostovih, ki jih pozimi solijo zaradi poledice, že po dvajsetih letih uporabe ugotavljamo večje ali manjše poškodbe. Najpogostnejše poškodbe so razni izločki in poškodbe zaščitne plasti nad armaturo (razpokanost, luščenje in odpadanje) zaradi korozije armature. Glavni vzroki za nastanek teh poškodb so:

- pospešena *karbonatizacija* betona, zlasti na prometnih poteh in v mestih, kjer je koncentracija ogljikovega dioksida tudi desetkrat večja od normalne; karbonatizacija pa je eden od vzrokov za znižanje alkalnosti betona, ki jekleni armaturi nudi pasivno zaščito pred korozijo,
- *kloridi* v soleh za odtaljevanje vozišč in v morski vodi oz. v priobalni atmosferi, ki še hitreje uničijo pasivno zaščito (depasivizirajo) vgrajene armature,
- *temperaturne spremembe* in *delovanje mraza*, zlasti v prisotnosti talilnih soli, ker povzročajo razpadanje cementnega kamna,
- *delovanje mehke vode* in vode z veliko količino prostega CO_2 , ker razgrajuje cementni kamen in zmanjšuje gostoto betona.

Razpadanje betona je v večini primerov kombinacija več vplivov. Zgoraj naštetim se pogosto pridružijo še krčenje in lezenje betona, slaba zasnova in izvedba konstrukcije in njenih detajlov ter napake pri gradnji.

S problemi trajnosti betonskih konstrukcij se srečujemo na treh področjih, in sicer pri:

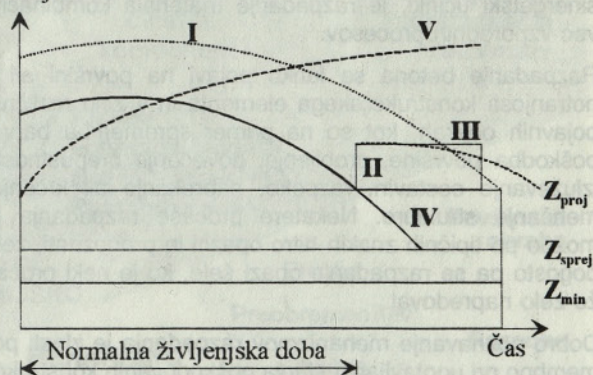
1. projektiranju in zagotavljanju trajnosti oz. življenjske dobe novih konstrukcij,
2. ugotavljanju stanja in napovedovanju preostale življenjske dobe obstoječih konstrukcij,
3. projektiranju sanacij, zlasti če se je kakovost betona in armature že toliko zmanjšala, da je vprašljiva varnost konstrukcije.

Trajnost ni absolutna lastnost konstrukcije, ki bi jo bilo mogoče enostavno računsko ovrednotiti, ampak je odvisna od:

- odpornosti samega betona na agresivne vplive okolja; lastnosti, ki zagotavljajo odpornost betona na agresivne vplive, so poleg trdnosti in deformabilnosti najpomembnejši parametri njegove kakovosti,
- kakovosti izdelave oz. gradnje,
- oblike in geometrije prereza, oziroma načina oblikovanja detajlov konstrukcije, ki so posebej občutljivi za agresivne vplive okolja.

Trajnosti ni mogoče neposredno meriti, zato se običajno opisuje z življenjsko dobo konstrukcije. To je čas, ko je zanesljivost (varnost in uporabnost) konstrukcije še iznad določene minimalne in še sprejemljive vrednosti oz. ravni (slika 1). Merljivi pa so nekateri parametri odpornosti betona na določene agresivne vplive okolja.

Zanesljivost Z



Slika 1. Shematski prikaz trajnosti in življenjske dobe armiranobetonskih konstrukcij, izpostavljenih agresivnemu okolju.

- I – na začetku predimenzionirana konstrukcija;
- II – občasno obnovljena ali ojačena konstrukcija;
- III – po obnovi dodatno zaščitena konstrukcija;
- IV – konstrukcija, ki se uporablja s povečanim tveganjem;
- V – že med gradnjo dodatno zaščitena konstrukcija.

Odpornost betona na agresivne vplive in mehanizmi razpadanja

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 intenzivnosti zunanjih vplivov na konstrukcijo.

Konstrukcija iz iste vrste betona ima lahko pri različnih zunanjih vplivih različno odpornost na agresivne vplive in zato različno življenjsko dobo.

Nekdaj je veljalo, da so lastnosti, ki lahko vplivajo na odpornost kakega materiala in tudi betona, povezane predvsem z njegovo, najpogostejše kemično sestavo. Na primer, kemična odpornost betona proti delovanju morske vode ali sulfatov se je tradicionalno izboljševala z uporabo posebne vrste cementa, ki je odpornejši na delovanje sulfatov. Nove preiskave so pokazale, da se enaka ali boljša odpornost lahko doseže z izboljšanjem strukture cementnega kamna tako, da se zmanjša vodocementno razmerje in s tem poroznost cementnega kamna, ter da se cementu ali betonu doda nek učinkovit dodatek, npr. amorfni silicij (mikrosilika).

Mehanizmi razpadanja (degradacije) so procesi ali reakcije, ki spreminjajo lastnosti materiala ali celotnega gradbenega elementa. V naravnem okolju so procesi razpadanja materiala dolgotrajni in rezultat niza okoliščin, ki jih ne moremo spremljati v celoti, zato je pravi mehanizem razpadanja pogosto težko identificirati. Kjer nastopajo sinergijski učinki, je razpadanje materiala kombinacija več vzporednih procesov.

Razpadanje betona se lahko pojavi na površini ali v notranjosti konstrukcijskega elementa in v zelo različnih pojavnih oblikah, kot so na primer sprememba barve, poškodba površine, drobljenje, povečanje prepustnosti, izluževanje sestavin, razpoke, nabrekanje ali krčenje, mehčanje strukture. Nekateri procesi razpadanja je možno po tipičnih znakih hitro opaziti in prepoznati, zelo pogosto pa se razpadanje opazi šele, ko je neki proces že zelo napredoval.

Dobro poznavanje mehanizmov razpadanja je zlasti pomembno pri ugotavljanju stanja poškodovanih konstrukcij in zasnovi sanacije poškodovanih objektov, pa tudi pri projektiranju in zagotavljanju trajnosti zahtevnih objektov.

Projektiranje in zagotavljanje trajnosti

Tradicionalni pristop

Med tem ko so postopki računanja nosilnosti, stabilnosti in deformacij armiranih in prednapetih betonskih konstrukcij dobro definirani in temeljijo na načelih tehnične mehanike in teorije verjetnosti, se njihova trajnost še vedno v glavnem obravnava na podlagi izkušenj in tradicionalnih pravil stroke.

Veljavni in tudi novi evropski predpisi za projektiranje in

izvajanje armiranobetonskih in prednapetih konstrukcij obravnavajo vprašanja trajnosti tako, da predpisujejo določene lastnosti betona in/ali parametre njegove sestave, ki so iz izkušenj pomembni za njegovo odpornost (minimalna MB, maksimalno dovoljeno vodocementno razmerje v/c, minimalna potrebna količina cementa, aeriranje in drugo). Poleg tega zahtevajo skrbno in dosledno izvedbo postopkov vgrajevanja in negovanja. Obstajajo tudi priporočila oz. navodila za oblikovanje in izvedbo detajlov konstrukcij, ki so izpostavljene delovanju agresivnega okolja.

Alternativni racionalistični pristop

Pri projektiranju in gradnji zahtevnejših betonskih konstrukcij te tradicionalne metode zagotavljanja trajnosti ne zadoščajo več. Analiziranje parametrov odpornosti betona na predvidene agresivne vplive je namreč za zanesljivost konstrukcije enako pomembno kot analiza napetosti v konstrukciji. Za ta namen je potrebno uporabiti alternativne racionalistične (razumske) metode projektiranja trajnosti, t.i. inženirski koncept, ki temelji na:

- a) podatkih preiskav, ki ponazarjajo obnašanje in mehanizem razpadanja betona zaradi agresivnih vplivov v poznanem okolju
- b) uporabi analitičnih modelov za:

- delovanje fizikalnih in kemičnih vplivov, ki povzročajo razpadanje betona in armature in pomenijo pri projektiranju trajnosti obremenitev betona,
- mehanizme transporta agresivnih snovi v strukturi cementnega kamna, ki pogojujejo odpornost betona na zunanje agresivne vplive.

Čeprav so temeljni fizikalni zakoni za večino procesov, ki povzročajo razpadanje betona in armature, že dalj časa znani, so se šele v zadnjem desetletju pojavili prvi predlogi analitičnih modelov računanja življenjske dobe za nekatere agresivne vplive, npr. za delovanje posameznih kemično agresivnih snovi, korozijo armature, delovanje nizkih temperatur (zmrzovanje-odtaljevanje). Trenutno so raziskave osredotočene na iskanje uporabnih modelov za opis agresivnih vplivov, ki imajo za posledico korozijo armature, ker je le-ta prevladujoči vzrok razpadanja armiranobetonskih konstrukcij. To sta karbonatizacija betona in, zlasti pri betonskih objektih na cestah in ob morju, prodor kloridov.

Projektiranje trajnosti in napovedovanje življenjske dobe z alternativnimi metodami bo moralo postati sestavni del projektne dokumentacije zahtevnih novih objektov, napovedovanje preostale življenjske dobe obstoječih objektov pa pomemben faktor odločanja pri gospodarjenju z objekti, zlasti z mostovi.

Novi prEN 206 /6/ odpira vrata tem alternativnim metodam. V posebnem informativnem dodatku podaja načela in ključne predpostavke za njihovo neobvezno uporabo. Harmonizacije, t.j. obvezne uporabe teh metod na evropski ravni, pa seveda še nekaj časa ni pričakovati.

AGRESIVNI VPLIVI NA BETON IN POVZROČITELJI RAZPADANJA ARMIRANEGA BETONA

Vrste agresivnih vplivov

Med uporabo konstrukcije je beton izpostavljen podnebnim in tudi drugim agresivnim vplivom iz okolja ali zaradi uporabe. Le-te delimo v štiri skupine:

- mehanski,
- fizikalni,
- kemični in elektrokemični,
- biološki.

Za navedene štiri najpomembnejše agresivne vplive na beton so na sliki 2 prikazani:

- *v srednjem krogu:*
 - povzročitelj oz. izvor vsakega agresivnega vpliva,
- *v zunanjem krogu:*
 - posledice njihovega delovanja na armirani beton, ki se kažejo kot razpoke, zmanjšanje gostote, razpadanje, luščenje, nabrekanje, odpadanje in podobno.

Prodiranje agresivnih snovi v cementni kamen

Splošno

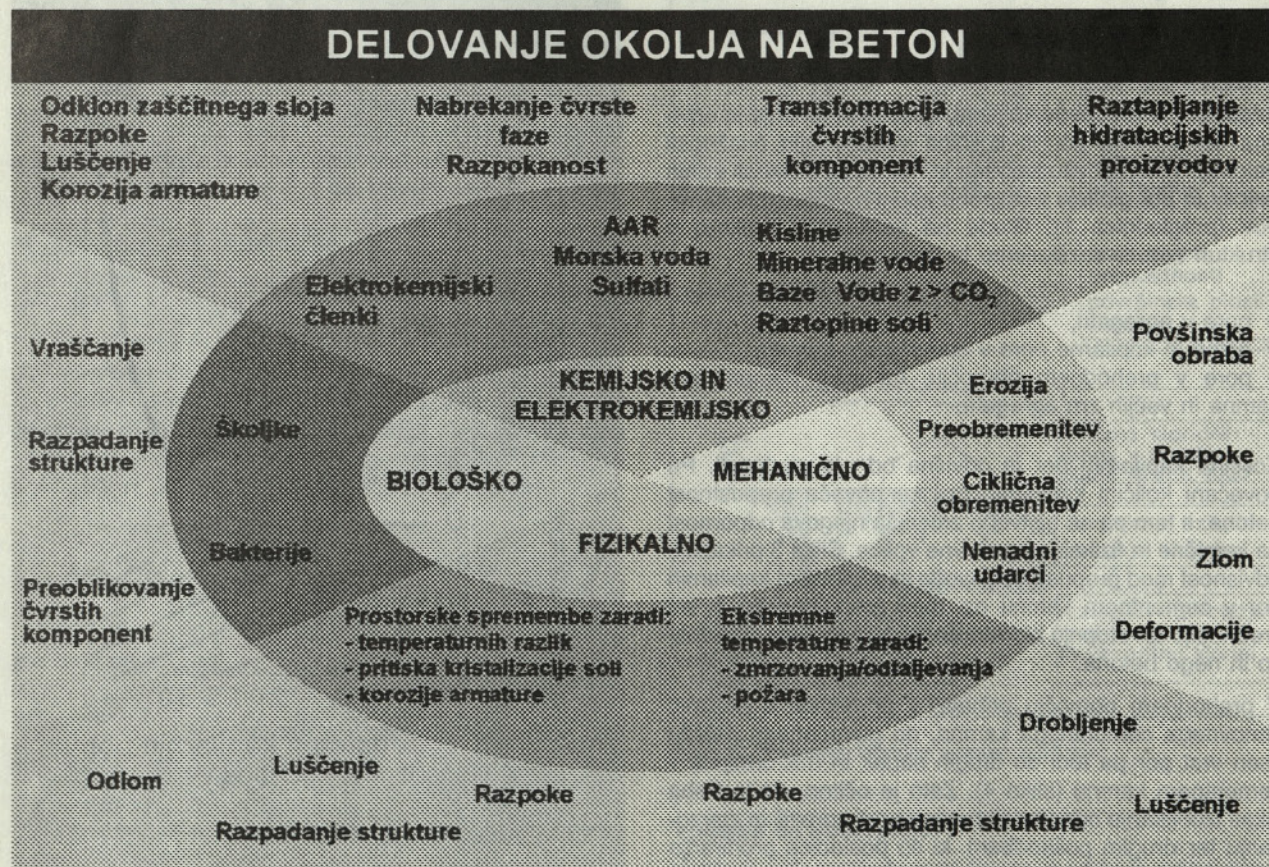
Razpadanje betona zaradi kemičnih in fizikalnih vplivov je v prvi vrsti posledica prodiranja (penetracije) agresivnih snovi v porozno strukturo betona s fizikalnimi procesi:

- vpijanja (absorpcije),
- difuzije in
- tečenja pod pritiskom.

Ti procesi lahko potekajo le v vodi, zato je za korozijo betona prisotnost vlage oziroma vode v porah cementnega kamna odločilna.

Stopnja kemične agresivnosti na beton je odvisna od vrste in koncentracije agresivne snovi, nanjo pa dodatno vplivajo tudi naslednje okoliščine:

- hitrost toka vode, ki vsebuje agresivne snovi in izplakuje sestavine cementnega kamna in apno iz porne vode; od hitrosti vode je odvisna hitrost prinašanja agresivnih snovi in odnašanja topnih produktov korozije betona,
- pogostost menjave vodostaja, ker prihaja po vsakem umiku vode do povečane koncentracije agresivnih snovi;
- trajanje delovanja agresivnega okolja,



Slika 2. Agresivni vplivi na beton, njihovi povzročitelji in posledice

Preglednica 1. Vrste in velikosti por in zakoni prenosa snovi v betonu

PORE V BETONU				TEHNOLOŠKI VPLIV	TRDNA FAZA	ZAKONI PRENOSA SNOVI			
POLMER (m)	(ORIENTACIJSKI DELEŽ)						DIFUZIJA	TEČENJE IN VPIJANJE	
10 ⁻⁹	GELNE PORE (28%)	MIKRO PORE		HIDRATACIJA CEMENTA	C - S - H Ca(OH) ₂				A° nm
10 ⁻⁸		MEZO PORE							
10 ⁻⁷	KAPILARNE PORE (0 - 10%)	MIKRO KAPILARE		v/c VREDNOST	SiO ₂ CEMENT				μm
10 ⁻⁶		KAPILARE							
10 ⁻⁵		MAKRO KAPILARE							
10 ⁻⁴	ZRAČNE PORE (0 - 8%)			AERANT	PESEK				mm
10 ⁻³									
10 ⁻²	PRAZNINE	VELIKE ODPRTE PORE		ZGOSTITEV SEDIMENTACIJA	AGREGAT	cm			

- enostranski pritisk na element, ker pospešuje vnos agresivnih snovi,
- povišana temperatura, ker pospešuje kemične procese,
- srednja debelina betonskega elementa, opredeljena kot razmerje med njegovo prostornino in površino, izpostavljeno agresivnemu vplivu.

Poroznost cementnega kamna

Intenzivnost procesov vpijanja, difuzije in tečenja je odvisna od sistema por in količine vode v njih (vlažnosti betona). V kompozitu kakršen je beton, se velikosti trdnih delcev in por gibljejo v razponu sedmih velikostnih razredov (preglednica 1). Glede na velikost in funkcijo v strukturi betona razlikujemo tri vrste por:

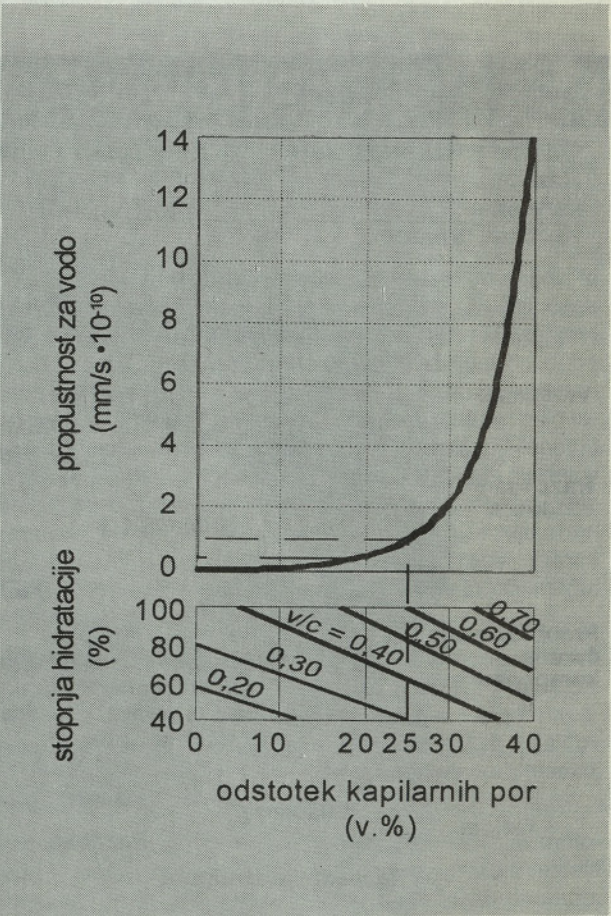
- pore v agregatu,
- gelne in kapilarne pore v cementnem kamnu,
- pore v prehodnem območju, na stiku cementnega kamna in večjih zrn agregata.

Količina kapilarnih por je odvisna od v/c vrednosti. Pri povečani količini kapilarnih por se poveča prepustnost betona, s tem pa se bistveno zmanjša njegova odpornost na kemične in fizikalne agresivne vplive. Slika 3 prikazuje odvisnost med prepustnostjo vode in odstotkom kapilarnih por v cementnem kamnu oz. med prepustnostjo in v/c vrednostjo ter stopnjo hidratacije, ki je pogojena s starostjo in nego betona.

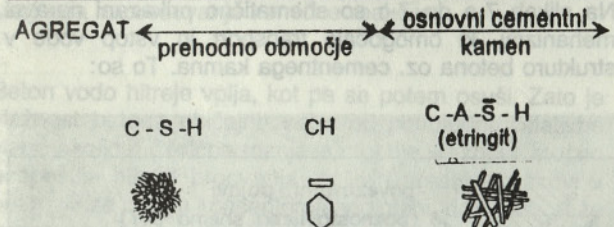
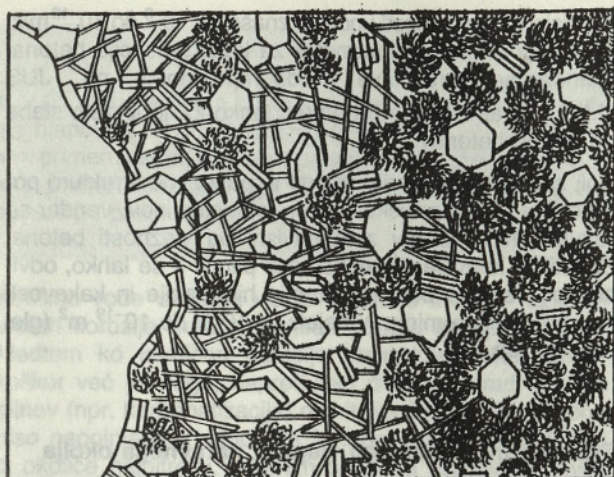
V prehodnem območju prihaja, v primerjavi s sestavo osnovnega cementnega kamna, do povečanega deleža vseh vrst por pa tudi do drugih napak in mikrorazpok v cementnem kamnu (slika 4). Zato je očitno, da je treba iskati izboljšanje odpornosti betona proti koroziji in zmrzovanju ter drugim poškodbam, ki so posledica prodiranja tekočin v beton, v izboljšanju kakovosti prehodnega območja.

Pore v betonu se lahko delijo še na:

- površinske in
- notranje, ki so lahko zaprte ali odprte in med seboj povezane.



Slika 3. Odvisnost med prepustnostjo in v/c vrednostjo



Slika 4. Model prehodnega območja

Značilne zaprte pore so zračne pore ali mikro pore, ki jih tvori kemični dodatek – aerant. So sorazmerno velike, desetkrat večje od kapilarnih, obdane pa so z opno in prekinjajo kapilarne pore. Tako preprečujejo direktni prenos tekočin, pri zmrzovanju-odtaljevanju pa omogočajo sproščanje pritiskov ledu na cementni kamen. (Glej: Zmrzovanje v prisotnosti soli za odtaljevanje)

Fizikalni procesi penetracije

Difuzija

Difuzija je gibanje snovi skozi beton zaradi kemičnega, vlažnostnega ali temperaturnega potenciala, proces pa se opisuje s Fickovimi zakoni. Če se koncentracija snovi po preseku betona s časom menja, kar je običajna situacija v betonskih elementih, izpostavljenih difuziji agresivnih snovi, opisuje ta pojav drugi Fickov zakon:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (\text{En. 1})$$

kjer pomenijo:

- $\frac{\partial C}{\partial t}$ – sprememba koncentracije s časom
- $\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$ – sprememba koncentracije po preseku
- D – koeficient difuzije (m^2/s)

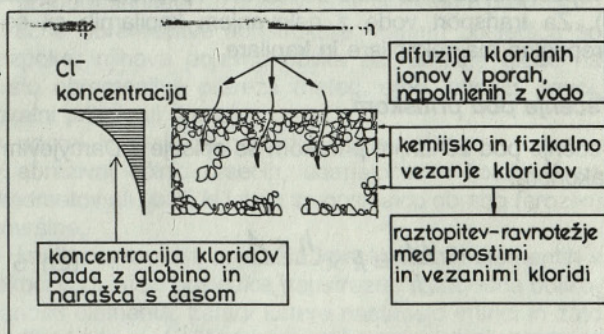
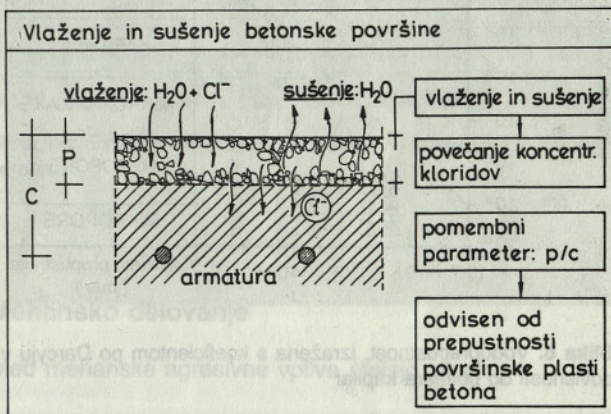
Za konkretne in poznane robne oz. začetne pogoje se gornja enačba rešuje numerično. Za enostavnejše geometrijske oblike in stacionarne pogoje prodiranja agresivnih medijev pridejo v poštev rešitve v zaprti obliki:

$$C_x = C_0 \left[1 - \text{erf} \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right] \quad (\text{En. 2})$$

kjer pomenijo:

- x – opazovana globina v mm
- t – čas v sekundah
- C_0 – začetna koncentracija, izražena v % na maso betona ali cementa
- C_x – kritična koncentracija, izražena v % na maso betona ali cementa
- erf – funkcija napake

Značilna primera gibanja snovi skozi beton po zakonu difuzije sta difuzija klorovih ionov (slika 5) in karbonatizacija zaradi prostega CO_2 v zraku (slika 9). Transport vlage z difuzijo je možen skozi mikrokapilare, gelne pore in pore zajetega zraka. Najpogosteje nastopijo kombinirani vplivi gradientov zaradi različnih koncentracij vlage ali raztopin in zaradi temperaturnih razlik.



Slika 5. Prodiranje kloridov v beton z difuzijo

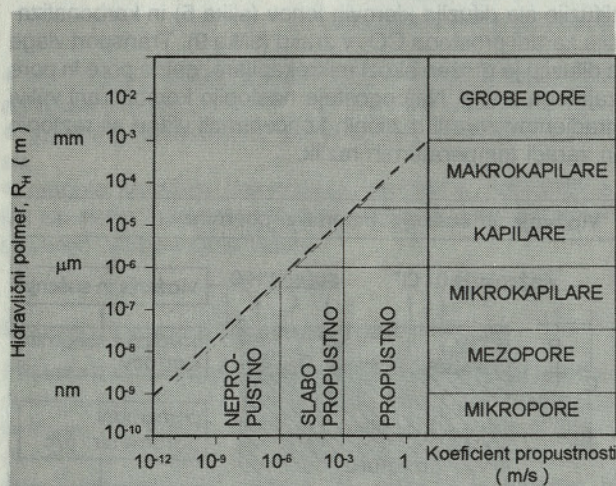
Vpijanje ali absorpcija

Količina vpijanja vode q_a v času t je odvisna od kapilarne poroznosti in je sorazmerna koeficientu kapilarnega vpija-

nja A, ki se izraža v $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$ in določi s preskusom.

$$q_a = \frac{A}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{t}} \quad (\text{En. 3})$$

Pri kapilarnem vpijanju sta pomembna dva pojavi: kapilarni pritisk in odpor proti kapilarnemu toku. Oba sta odvisna od velikosti polmera kapilar (r). Kapilarne sile, ki dvigajo vodo, so v ravnotežju s težo vode vodnega stolpca: $\rho_k = \rho \cdot g \cdot h$. Da bi prišlo do ravnotežja kapilarnih sil in teže vodnega stolpca, je potreben določen čas, ker dvigu vode v porah nasprotuje trenje na stenah. Dejanski kapilarni dvig je odvisen od spremenljive geometrije kapilar in od tega, ali gre za vlaženje ali sušenje betona. V vodi, ki se v kapilari dvigne, pa nastaja podtlak. Iz smeri kapilarnih sil je razvidno, da bo beton vodo zelo hitro vpiljal (*absorpcija*), med sušenjem pa jo bo zaradi podtlaka v kapilah zelo počasi oddajal (*desorpcija*).



Slika 6. Vodoprepustnost, izražena s koeficientom po Darcyju v odvisnosti od polmera kapilar

Prepustnost se zmanjšuje s kvadratom polmera por (slika 6). Za transport vode z delovanjem kapilarnih sil so prepustne makrokapilare in kapilare.

Tečenje pod pritiskom

Tečenje pod zunanjim pritiskom se opisuje z Darcyjevim zakonom:

$$\frac{dq}{dt} = k \times \frac{h \times A}{L} \quad (\text{En. 5})$$

kjer pomenijo:

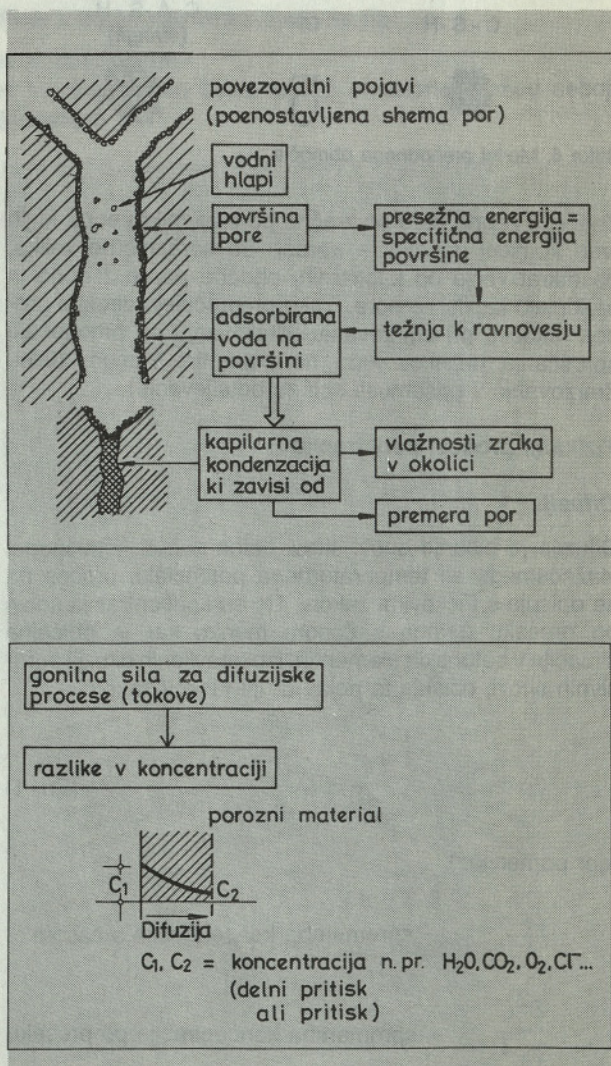
- q – pretok (litri),
- k – koeficient prepustnosti (m/s)
- h – sprememba pritiska na dolžini L (metri vodnega stolpca),
- A – površina pretočnega preseka (m^2),
- L – dolžina pretoka (m)

Koeficient prepustnosti vode, ki znaša od 10^{-8} do 10^{-10} m/s, ni najbolj primeren parameter za karakterizacijo betona. Standardne preiskave vodoprepustnosti po JUS U.M1.016 ali DIN 1048 namreč lahko ločijo le zelo slabe od dobrih betonov.

Bolj zanesljiv vpogled v odprto in povezano strukturo por v betonu dajejo preiskave prepustnosti plinov, vendar so rezultati teh meritev zelo odvisni od vlažnosti betona. Specifični koeficient prepustnosti plinov k se lahko, odvisno od sestave betona, stopnje hidratacije in kakovosti negovanja, spreminja v mejah od 10^{-14} do 10^{-19} m^2 (glej preglednico 1).

Transportni mehanizmi vlage iz naravnega okolja

Na slikah 7-a do 7-c so shematično prikazani naravni mehanizmi, ki omogočajo transport in vstop vode v strukturo betona oz. cementnega kamna. To so:

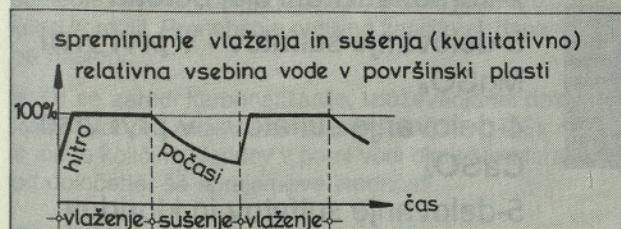
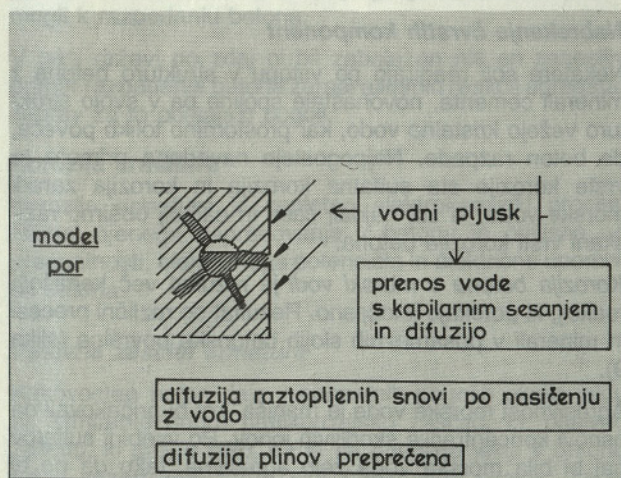


Slika 7-a. Transportni mehanizem vode v primeru vlažnega zraka

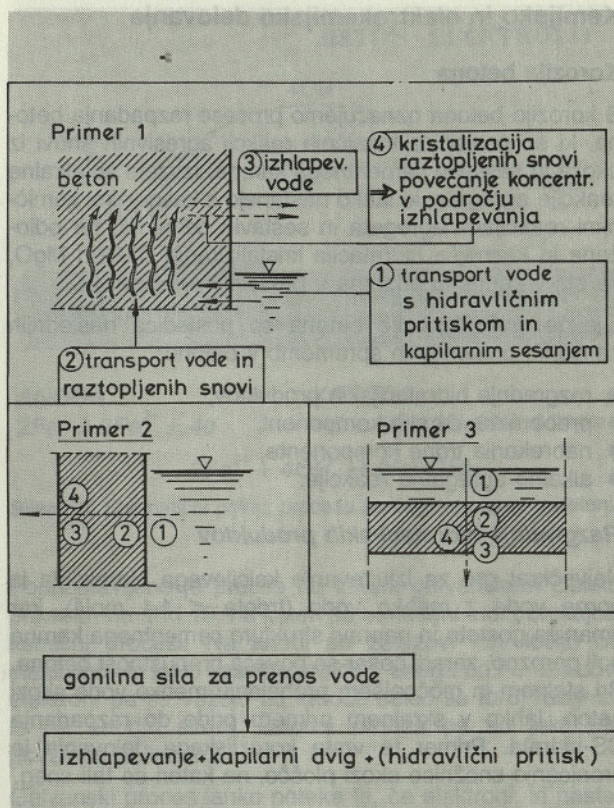
- v primeru vlažnega zraka, prodiranje (penetracija) vodnih hlapov iz okolice z difuzijo (slika 7-a),
- v primeru dežja, kapilarno sesanje in difuzija (slika 7-b),
- v primeru potopljenega betona, kapilarno sesanje in hidravlični pritisk (slika 7-c).

Količina vode oziroma vlage v betonu ima pri različnih vrstah korozije betona različen pomen (preglednica 2). Medtem ko kemična agresija napreduje toliko hitreje, kolikor več je vlage, napredujejo procesi zaradi difuzije plinov (npr. karbonatizacija) najhitreje, kadar pore betona niso napolnjene z vodo, ker je tedaj dostop plina (CO_2) iz okolice najhitrejši, obenem pa je na razpolago dovolj vlage za napredovanje kemične reakcije.

Beton vodo hitreje vpija, kot pa se potem osuši. Zato je vlažnost betona običajno večja od povprečne relativne vlage okolice. Ciklična menjava stopnje vlažnosti močno pospešuje hitrost prodiranja topljivih agresivnih snovi v beton, ki se potem koncentrirajo v globini, do katere seže izparevanje.



Slika 7-b. Transportni mehanizem vode v primeru dežja



Slika 7-c. Transportni mehanizem vode v primeru potopljenega betona

Mehansko delovanje

Med mehanske agresivne vplive štejejo zlasti:

- preobremenitev razpoložljivega nosilnega prereza in ciklične obremenitve konstrukcije, katerih posledica so razpoke; njihova pojavnost oblika se razlikuje glede na vrsto obremenitve prereza (nateg, strig, upogib, vzvoj, lokalni pritisk ali drugo)
- udarci, ki imajo za posledico lome betona,
- abrazivni učinki drsečih, udarjajočih in kotalečih se predmetov ali vozil, ki imajo za posledico obrabo (erozijo) površine,
- kavitacija v obliki zajed na konstruktivnih elementih v tekoči vodi, ki so posledica neustrezne hidravlične oblikovanosti elementa, zaradi katere nastanejo vrtinci in zato podtlaki na površini betona.

Cementni kamen ima razmeroma majhno odpornost na mehanske obremenitve. Odpornost betona na abrazijo se zato zagotavlja z uporabo na obrus odpornejšega agregata, primerno nizkim v/c razmerjem in kolikor mogoče majhno vsebnostjo cementne paste.

Kemijsko in elektrokemijsko delovanje

Korozija betona

S korozijo betona označujemo procese razpadanja betona, ki so posledica kemičnih reakcij agresivnih snovi iz okolja in sestavin cementnega kamna. Izvzete so alkalne reakcije agregata, ki lahko nastanejo s kasnejšimi kemičnimi reakcijami agregata in sestavin cementa, ter odložena in kasnejša hidratacija kristaliziranih CaO in MgO, če sta v cementu prisotna v prevelikih količinah.

Glavne vrste korozije betona so posledica naslednjih kemičnih procesov in sprememb v betonu:

- razgradnje hidratacijskih produktov,
- preobrazbe čvrstih komponent,
- nabrekanja trdne komponente,
- alkalno agregatne reakcije.

Razgradnja hidratacijskih produktov

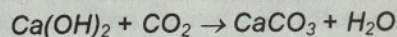
Največkrat gre za izluževanje kalcijevega hidroksida iz porne vode z mehko vodo (trdota < 1,1 mol/l), kar zmanjša gostoto in napravi strukturo cementnega kamna bolj porozno, zaradi česar se poveča prepustnost betona. Pri stalnem in močnejšem prehajanju mehke vode skozi beton, lahko v skrajnem primeru pride do razpadanja CS-hidrata. Primer te vrste korozijskega delovanja je pronicanje snežnice skozi ploščo, na kateri se tali sneg.

Preobrazba čvrstih komponent in karbonatizacija betona

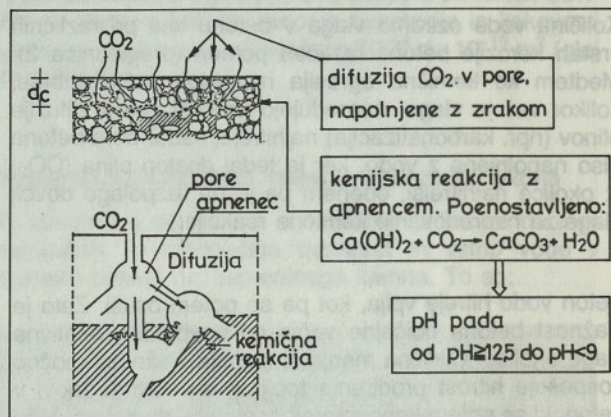
Kadar na cementni kamen delujejo kisline ali soli, ki so nastale iz šibkih baz ali močnih kislin, se običajno tvorijo lahko topeljive soli in voda. V teh reakcijah je kalcijev hidroksid znova najbolj zastopana spojina v betonu. Novo nastale spojine so nestabilne in običajno lahko topne, zato prihaja do razrahljanja strukture in povečanja prepustnosti ter zmanjšanja trdnosti korodiranega dela betona. Ta vrsta korozije nastopa pri betonu, ki je v stiku z mineralnimi vodami, kislinami, raztopinami soli pa tudi z zelo močnimi bazami.

Posebej pomembno in zanimivo je delovanje ogljikove kisline na beton. Ogljikov dioksid se nahaja v vodi v več

oblikah: kot trdno vezani CO₂ v karbonatih (npr. CaCO₃), kot delno vezani CO₂ v hidrokarbonatih (npr. Ca(HCO₃)₂), kot ogljikova kislina in kot prosti CO₂ v zraku. Apno, ki se v betonu sprosti pri hidrolizi z ogljikovo kislino, prehaja v slabo topljivi karbonat:



Ta pojav imenujemo karbonatizacija betona (slika 8).



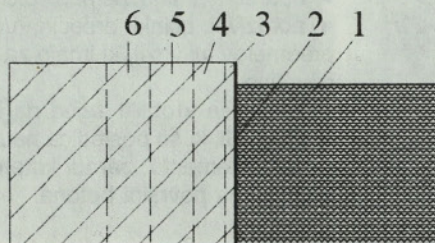
Slika 8. Shematični model karbonatizacije betona

Nabrekanje čvrstih komponent

Nekatere soli reagirajo po vstopu v strukturo betona z minerali cementa, novonastale spojine pa v svojo strukturo vežejo kristalno vodo, kar prostornino toliko poveča, da beton razpade. Najpogostejše navedena primera te vrste korozije sta sulfatna korozija in korozija zaradi morske vode, ki sta najdalj časa in najbolj obširno raziskani vrsti korozije betona.

Korozija betona v morski vodi je rezultat več kemičnih reakcij, ki potekajo istočasno. Rezultat so različni procesi in minerali v posameznih slojih betonske površine (slika 9).

Agresivnost morske vode je manjša, kot bi pričakovali na osnovi koncentracije škodljivih ionov. Po vsebini sulfatov naj bi bila morska voda zelo agresivna, tako da ne bi



Slika 9. Shema procesa korozije betona v morski vodi

1-morska voda

2-karbonatizirani sloj betona

3-delovanje sulfatov - v prvi vrsti MgSO₄

4-delovanje sulfatov - v prvi vrsti CaSO₄

5-delovanje sulfatov in kloridov

6-izluževanje betona

smela priti v stik z betonom. Vendar so zaradi reakcij, pri katerih nastajajo netopne spojine, škodljive reakcije bistveno upočasnjene.

Glavni problem armiranobetonskih konstrukcij v morskem okolju je korozija armature, ki nastane zaradi delovanja kloridov. Najbolj kritična v tem pogledu so območja nihanja morske gladine in pljuskanja valov.

Alkalno agregatna reakcija

Obstaja več reakcij agregatov in alkalnih snovi, ki se nahajajo v cementnem kamnu ali naknadno vstopajo v beton iz okolja. Reakcije se razlikujejo po kemičnih procesih, produktih kemičnih reakcij in po posledicah za beton.

Najbolj znani sta alkalnosilikatna in alkalnodolomitna reakcija. Čeprav so natrijevi in kalijeve oksidi v cementu prisotni le v majhnem deležu, lahko kot najmočnejše baze zelo močno reagirajo z določenimi reaktivnimi vrstami agregatov, kot so opal, roženec, andezit, riolit, zeolit in dolomitni apnenci. Poškodbe zaradi teh reakcij so zelo razširjene na objektih v Ameriki, Avstraliji, južni Afriki, severni Nemčiji in na Danskem, ki so bili zgrajeni v času, ko ta pojav še ni bil razjasnjen. Prej so te poškodbe pripisovali delovanju zmrzali ali krčenju in nabrekanju betona, torej procesom, ki so šele kasneje, po nastanku poškodb zaradi alkalnih reakcij agregata, dodatno pripomogli k razpadanju betona.

V naši državi do zdaj ni bil zabeležen niti en zanesljiv primer razpadanja betona zaradi alkalnih reakcij agregata, čeprav za to obstajajo pogoji.

Korozija armature

Korozija armature je zapleten elektrokemijski proces. Hitrost njenega napredovanja v betonu je odvisna od prepustnosti, električnega potenciala in električne upornosti betona.

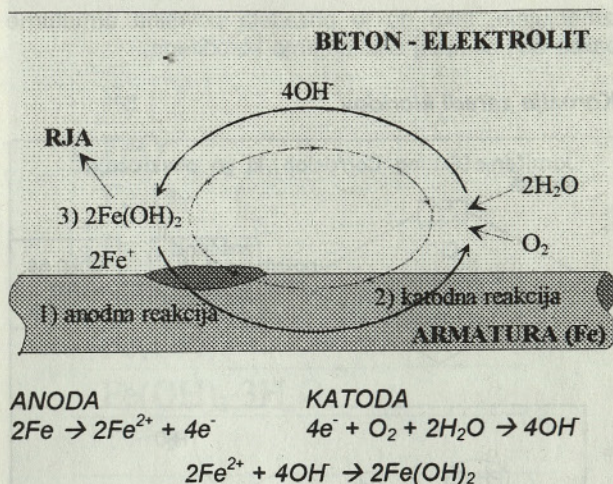
Pasivna zaščita armature

Kakovosten beton daje v normalnih pogojih okolja jeklu za armiranje dobro protikorozijsko zaščito, t.i. pasivno zaščito, ki deluje tako, da je na površino jekla v betonu trdno vezan zelo tanek sloj železovega oksida. Ta je kompakten in stabilen, dokler je pH vrednost betona okoli njega dovolj visoka (večja od 12). V hidratiziranem cementnem kamnu ustvarjajo bazičnost alkalni oksidi in kalcijev hidroksid, ki je eden od produktov hidratacije cementa. Dokler obstaja pasivna zaščita, jeklo ni izpostavljeno koroziji. Prenehanje pasivne zaščite ali depasivacija pa nastopi:

- če se zaradi karbonatizacije, izluževanja ali delovanja kislih raztopin zniža alkalnost betona ($\text{pH} < 9,5$), ali
- če je količina kloridov v porni vodi okoli armature večja od določene, še sprejemljive vrednosti.

Elektrokemijska korozija

Pri elektrokemijskem procesu korozije nastajajo na površini jeklenih palic korozijske celice, anoda in katoda.



Slika 10. Shematični prikaz procesa korozije armature v betonu

Poenostavljeno je proces na takem galvanem členu prikazan na sliki 10, na kateri so označeni tudi potekajoči kemični procesi. Na anodi se železovi ioni ločijo od elektronov in jeklo kasneje preide v enega od Fe-oksidov, elektroni pa se vežejo na katodi. Jeklo se torej razgradi le na anodni strani, katodni proces pa na jeklu ne povzroča poškodb.

Galvanski proces lahko poteka le, če elektroni, ki nastanejo z ionizacijo železa na anodi, tečejo proti katodi in če je na površini armature dovolj vode in kisika, da vežeta elektrone v OH⁻ ione. Za začetek korozijskega procesa jekla morajo zato biti izpolnjeni naslednji trije pogoji:

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

Če le eden od gornjih treh pogojev ni izpolnjen, npr., če je beton suh ali če je nasičen z vodo, korozija ne more nastopiti, čeprav bi bilo jeklo depasivirano.

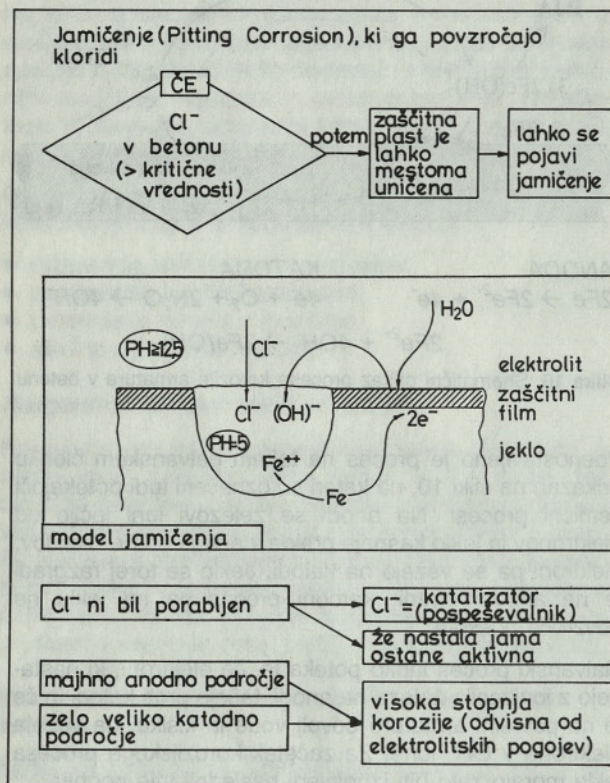
Določena razlika električnih potencialov je običajno vedno prisotna in je lahko posledica:

- prisotnosti še neke kovine v betonskem elementu ali
- razlik v mikrostrukturi jekla in prisotnosti nečistoč v jeklu ali
- različnih koncentracij raztopine (elektrolita) v betonskih porah.

Elektrokemijska korozija nastopi najpogosteje, če je depasivacija posledica karbonatizacije. V tem primeru nastanejo majhne anodne in katodne površine, ki se med seboj

izmenjujejo, tako da je prizadeta površina armaturne palice bolj ali manj enakomerno korodirana.

Korozija zaradi kloridov



Slika 11. Difuzija klorovih ionov v betonu in nastanek jamičaste korozije

Prenehanje pasivne zaštite zaradi prodora kloridov ima za posledico t.i. jamičasto korozijo (pitting), kar je shematično prikazano na sliki 11. V tem primeru obstajajo na površini jekla velike katodne površine in zelo majhna anodna območja, na katerih je prenehala pasivna zaštita. V jami poteka in se širi korozijski proces, ki ima za posledico lokalno zmanjšanje prereza armaturne palice.

Začetek depasivacije zaradi kloridov je odvisen od molarne razmerja Cl^-/OH^- . Če je molarno razmerje Cl^-/OH^- večje od 0,6, železo ni več zaščiteno pred korozijo, ker postane zaščitni sloj nestabilen in prepusten za kloride. Klorovi ioni, ki so prodrli do armature, kemično reagirajo in nastane železov klorid (FeCl_2), ki prehaja z vodo v železov hidroksid (rjo), prosti vodik in ponovno klorid, tako, da nastane galvanski člen z lokalno omejeno anodo in veliko katodo. Med korozijskim procesom se kloridi torej ne porabijo, ampak ostanejo še naprej na razpolago pri širjenju korozije, zato je trajna in zanesljiva sanacija s kloridno korozijo prizadete betonske konstrukcije težka strokovna naloga.

Cementni minerali lahko en del kloridov kemično vežejo v Friedlovo sol in se zato ta del ne vključuje v korozijski

proces. Sposobnost cementa, da veže kloride, je odvisna od njegove mineralne sestave, v prvi vrsti zadosti velike količine C_3A . Na korozijo namreč vplivajo le t.i. prosti kloridi, tisti, ki so raztopljeni v porni vodi cementnega kamna.

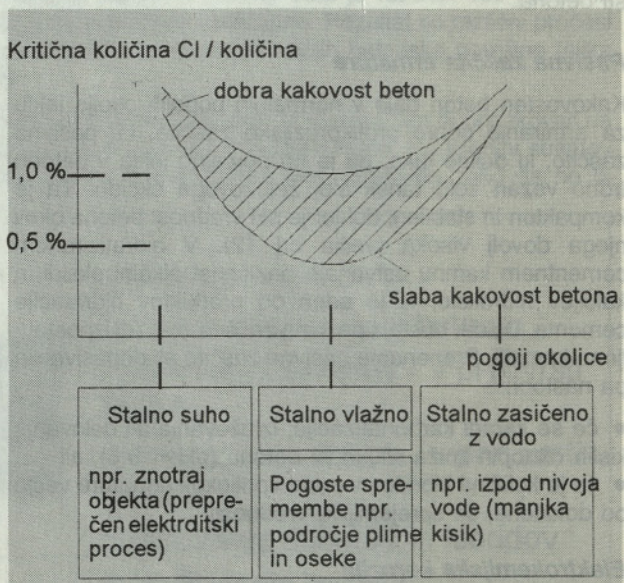
Zaradi nezanesljivosti podatkov o količini vezanih in prostih kloridov v nekem betonu, določa večina predpisov in strokovnih priporočil kot dopustno mejo klorovih ionov okoli armature v betonu skupno količino kloridov (vezanih + topnih), in sicer med 0,4 in 0,6 % na maso cementa v betonu. Jeklo za prednapenjanje je zaradi možne napetostne korozije in vodikove krhkosti za korozijo bolj občutljivo, zato so te dopustne vrednosti približno polovico manjše.

Ta meja je bistveno odvisna od vlažnosti in kakovosti betona, pri čemer je slednja opredeljena z debelino in prepustnostjo zaščitnega sloja, ta pa je odvisna od v/c vrednosti in stopnje negovanja. Na sliki 12 je prikazana kvalitativna odvisnost kritične vsebnosti Cl^- ionov na količino cementa od obeh pogojev. Iz nje je razvidno, da lahko pri kakovostnem suhem betonu znaša vsebnost kloridov v območju armature tudi do 1 ut. % na maso cementa.

Kloridi povečujejo higroskopičnost, zato se poveča vlažnost, zmanjša pa električna upornost betona. Beton se tako nikoli popolnoma ne osuši in se zato dodatno poveča tveganje za korozijo armature. Ko je pasivna zaštita armature že prebita, je hitrost korozijskega procesa določena z električno upornostjo betona in z razpoložljivo količino kisika, ki prihaja z difuzijo iz okolice betona.

Kloridna korozija je mnogo nevarnejša od elektrokemijske korozije. Razlogi za to so:

- opozorilni znaki korozije se pojavijo na površini šele ko je proces že zelo napredoval, zaradi česar je otežano



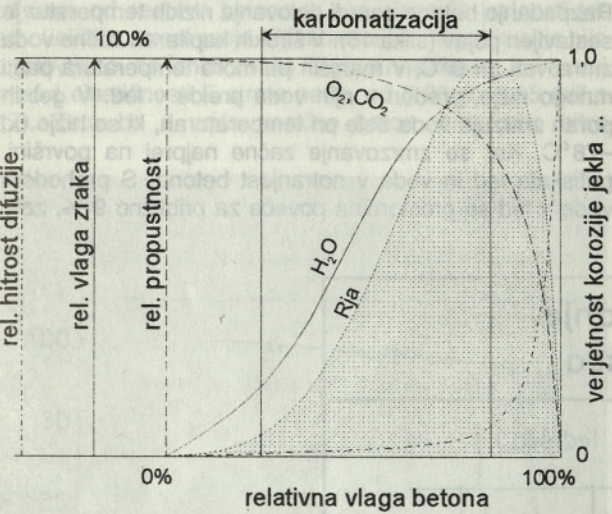
Slika 12. Kvalitativna odvisnost kritične količine kloridov od pogojev vlažnosti okolice in kakovosti zaščitnega sloja betona

pravočasno ukrepanje,

- kloridi povzročijo depasivacijo tudi v visoko alkanem betonu.

Korozija armature, ki nastane zaradi delovanja kloridov je tudi glavni problem armiranobetonskih konstrukcij v morskem okolju. Najbolj kritična v tem pogledu so območja nihanja morske gladine in pljuskanja valov.

Vlažnostni pogoji in posledice korozije



Slika 13. Simultani pogoji za elektrokemijsko korozijo železa v betonu

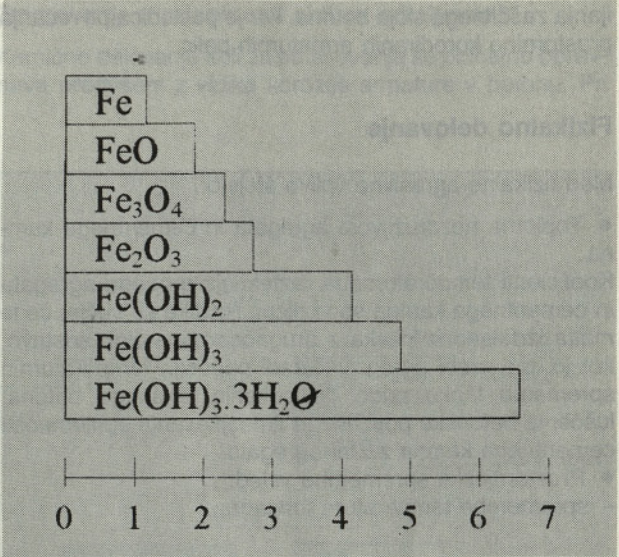
Na sliki 13 je kvalitativno prikazana verjetnost korozije v odvisnosti od vlažnosti betona (šrafirana površina) in vpliv vlažnosti betona na prodiranje glavnih agensov korozije: kisika (O_2), kloridovih ionov (Cl^-) in CO_2 .

Na mestu razpok prodirata karbonatizacija in kloridi proti armaturi nekajkrat hitreje, kot v nerazpokanem betonu. Razpoke do širine 0,4 mm se navadno same zapolnijo in zalečijo z umazanijo, kalcijem in rjo in zato za obstojnost konstrukcije še niso nevarne.

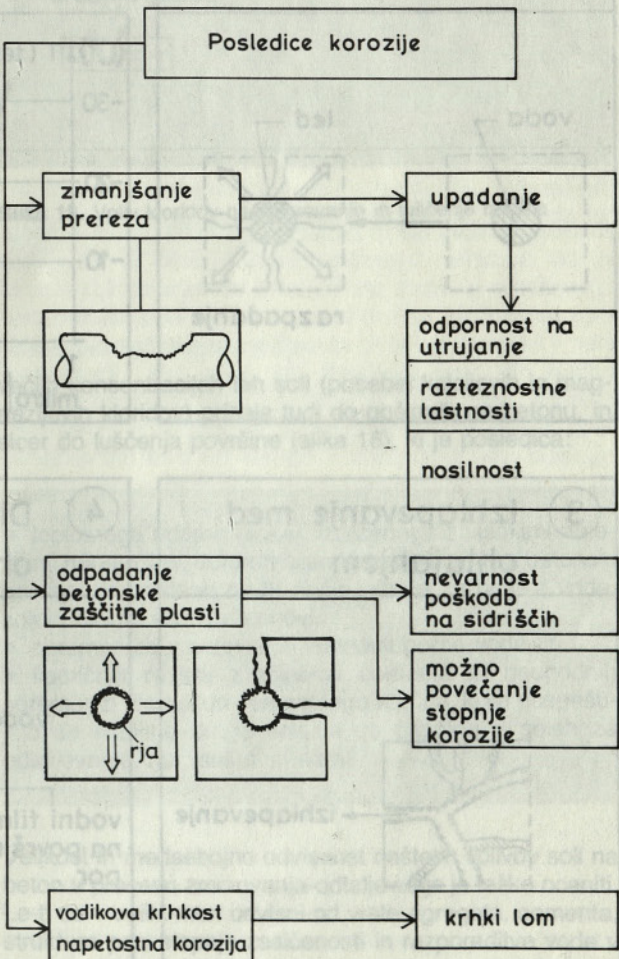
Korzijski produkti, oziroma rja, imajo lahko različne oblike oksidov ali hidroksidov, njihova prostornina pa je lahko, odvisno od njihove kemične sestave, do šestkrat večja od prostornine železa, ki je reagiralo (slika 14).

Pri kloridni koroziji pa se prostornina korzijskih produktov poveča le za 20 do 50%, zato so ekspanzijske sile majhne in ne povzročajo razpok v zaščitnem sloju, ki so sicer pomemben, na površini viden opozorilni znak o že potekajoči koroziji.

Učinki in posledice elektrokemijske korozije armature so celovito prikazani na sliki 15. V prvi fazi prodirajo agresivne snovi v beton brez vidnih posledic. V drugi fazi se na površini betona pojavijo rjave lise rje in značilne razpoke vzdolž armaturnih palic, posebej v vogalih, kjer so najbolj izpostavljene dostopu agresivnih snovi v beton. V tretji fazi prihaja do odvajanja (delaminacije) in odlam-



Slika 14. Možne oblike železovih oksidov in hidroksidov in pripadajoči faktor povečanja



Slika 15. Shematični prikaz učinkov in posledic korozije armature

ljanja zaščitnega sloja betona, kar je posledica povečanja prostornine korodiranih armaturnih palic.

Fizikalno delovanje

Med fizikalne agresivne vplive štejejo:

- Toplotna nezdružljivost agregata in cementnega kamna:

Koeficienti temperaturnega raztezanja grobega agregata in cementnega kamna so različni. Razlike so večje, če je malta izdelana iz peska z drugačno mineralno sestavo, kot jo ima grobi agregat. Zaradi pogostih temperaturnih sprememb lahko pride do pokanja takšnega betona, luščenja betonske površine in zmanjševanja sprijemnosti cementnega kamna z zrni agregata.

- Prostorninske spremembe vsled:
 - spremembe temperature in vlage,

- kristalizacijskih pritiskov.

Izmenično vlaženje in sušenje betona povzroča nabrekanje in krčenje betona. Ta pojav bistveno pospešuje poškodbe betona, ki so sicer posledica ciklusov zmrzovanja in odtaljevanja betona.

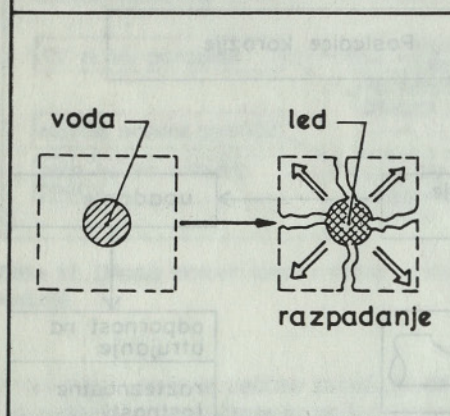
- Ekstremne temperature pri:

- zmrzovanju/odtaljevanju,
- požaru.

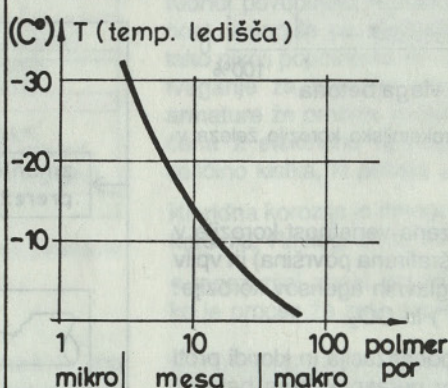
Zmrzovanje – odtaljevanje

Razpadanje betona zaradi delovanja nizkih temperatur je sestavljen pojav (slika 16). V širokih kapilarah začne voda zmrzovati pri 0°C , v manjših pa mora temperatura pasti mnogo nižje, preden v njih voda preide v led. V gelnih porah zmrzuje voda šele pri temperaturah, ki so nižje od -78°C . Ker se zmrzovanje začne najprej na površini, pritiskata led in voda v notranjost betona. S preходом vode v led se prostornina poveča za približno 9 %, zato

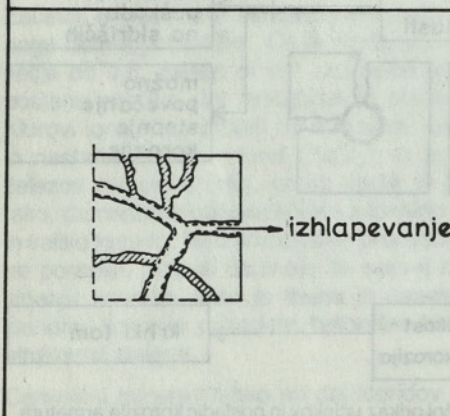
1 Povečanje prostornine po zmrzovanju + 9%



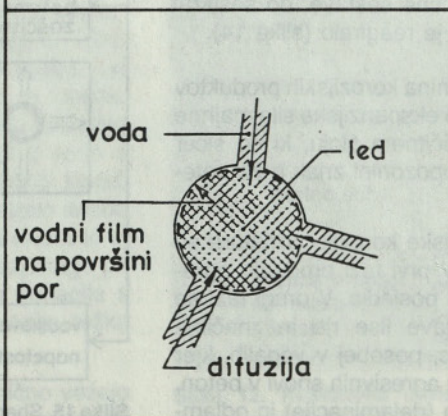
2 Znižanje ledišča



3 Izhlapevanje med ohlajanjem



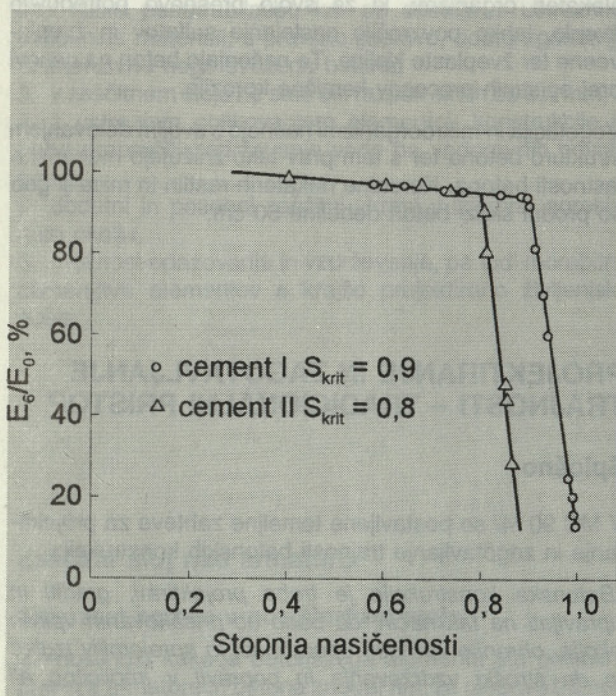
4 Difuzija med ohlajanjem



Slika 16. Zmrzovanje vode v betonu

nastane pritisk ledu na stene kapilar in na vodo globlje v kapilarah. Ko postanejo pritiski preveliki, pride do pokanja cementnega kamna. Naslednje odtaljevanje omogoča vpijanje novih količin vode, tako da ciklusi zmrzovanja-odtaljevanja črpajo novo vodo v strukturo betona, ki spet zmrzne in povzroča dodatne pritiske, zaradi katerih se cementni kamen zdrobi.

Do poškodb v obliki lomljenja in razpadanja betona, ki se začne s pojavom razpok, pride pri določeni stopnji zasičenosti por z vodo. To je *kritična nasičenost* S_{CR} , ki je odvisna od sestave betona in več njegovih lastnosti ter od okoliščin zmrzovanja. Z laboratorijskimi poskusi je bilo ugotovljeno, da lahko znaša kritična nasičenost, pri kateri modul elastičnosti E strmo pade, od 0,80 do 0,95 (slika 17). Zato bo z vodo nasičen beton mrz zelo hitro



Slika 17. Kritična nasičenost betona

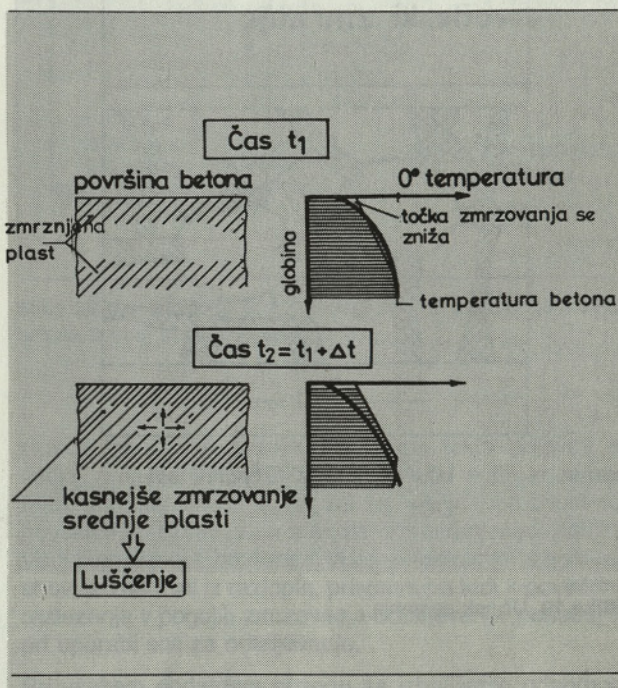
razdejal, suhemu betonu pa nizke temperature ne bodo škodovali. Posebej pri mladem betonu, ki vsebuje v porah še velike količine proste vode, prihaja zelo rado do te vrste poškodb, prepoznavnih po značilnem luščenju površinskega sloja malte, ki ima sam zase še vedno dobro trdnost.

Poškodbe zaradi zmrzovanja se na normalno strjenem betonu običajno pojavijo šele po več ciklih zmrzovanja-odtaljevanja, takrat, ko se beton med posameznimi cikli ne more vsaj delno posušiti.

Pomemben dodatni vzrok za razpadanje betona v pogojih zmrzovanja-odtaljevanja je razlika v toplotnih razteznostnih koeficientih cementnega kamna in agregata.

Zmrzovanje v prisotnosti soli za odtaljevanje

Kemično delovanje soli za odtaljevanje se običajno obravnava predvsem z vidika korozije armature v betonu. Pri

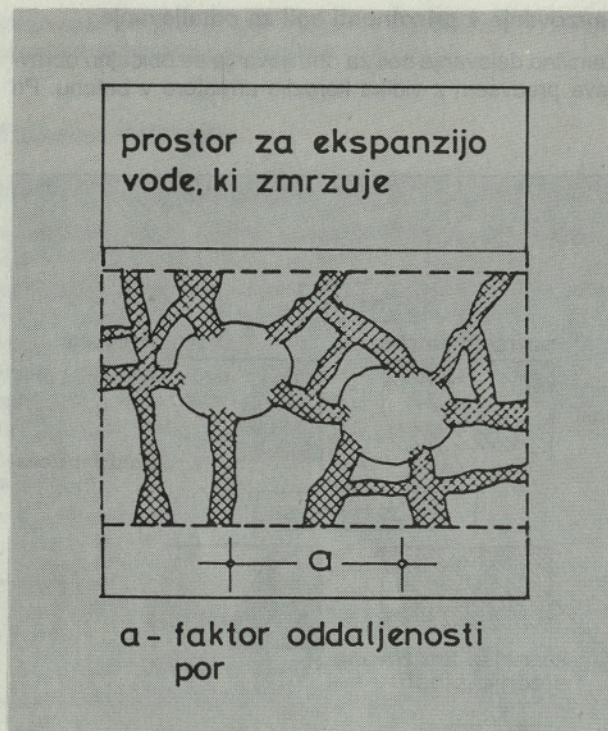


Slika 18. Vpliv kloridov na zmrzovanje in luščenje betona

večjih koncentracijah teh soli (posebej kalcijevih in magnezijevih kloridov) prihaja tudi do poškodb na betonu, in sicer do luščenja površine (slika 18), ki je posledica:

- toplotnega udarca (šoka), izraženega z visokimi nateznimi napetostmi, deformacijami in razpokami na betonski površini, ki postane na ta način odprta za prodor vode, soli in drugih škodljivih snovi,
- spremembe zmrzovalnih lastnosti porne vode, in
- kemičnih reakcij z minerali cementa in neugodnih sprememb v strukturi cementnega kamna, ki jih pospešujejo še različne druge soli, ki so prisotne v soleh za odtaljevanje, npr. sulfati in nitrati.

Velikost in medsebojno odvisnost naštetih vplivov soli na beton v procesu zmrzovanja-odtaljevanja je težko oceniti. Le-ti so v veliki meri odvisni od vrste agregata, cementa, strukture por, stopnje zasičenosti in razporeditve vode v betonu, hitrosti hlajenja in segrevanja, starosti betona, oblike betonskih elementov.



Slika 19. Učinek aeriranja

Aeriranje

Najbolj učinkovit ukrep za zagotovitev obstojnosti betona, ki bo podvržen zmrzovanju-odtaljevanju je aeriranje, t.j. vnašanje umetnih por velikosti od 0,05 do 1,0 mm, ki niso napolnjene z vodo in predstavljajo ekspanzijski prostor, v katerega se lahko sprostijo pritiski ledu in hidravlični pritiski na stene kapilarnih por (slika 19). Učinkovitost sistema umetnih por je odvisna od razdalje med porami, ki jo pogojuje skupna količina teh mikropor. Povprečna razdalja med mikroporami namreč ne sme biti večja od določene kritične razdalje a , za obstojnost pa je pomemben tudi delež por, ki so manjše od 0,3 mm (L_{300}). Potrebna kritična razdalja je odvisna od pogojev zmrzovanja in mora biti tem manjša, čim ostrejši so ti pogoji: nizke nihajoče temperature, trajna vlažnost, istočasna prisotnost soli za odtaljevanje. Za neposredno ogrožene elemente, kot so npr. robni venci mostov, je treba doseči $a \leq 0,2 \text{ mm}$ in $L_{300} > 1,5\%$.

Negativna stran aeriranja je zmanjšanje trdnosti betona. Po izkušnjah znaša okoli 4 – 5 % za vsak odstotek vsebnosti mikropor. To je treba upoštevati zlasti pri nosilnih konstrukcijskih elementih, ki pa so ponavadi le posredno ogroženi zaradi delovanja talilnih soli. Za večino neposredno ogroženih elementov pa zahtevana tlačna trdnost običajno ni posebno visoka.

Vsebnost por v strjenem betonu, njihov delež do $300 \mu\text{m}$ in razdalja med njimi se določajo z metodo linijske mikroskopije po prEN 480-11.

Vsebnost por v svežem betonu se meri s pomočjo porozimetra, kjer pa je treba upoštevati, da se obenem odčitava tudi količina t.i. zajetega zraka, ki se z vibriranjem ni izločil iz betona.

Biološko delovanje

Beton je lahko odlična podlaga za vegetacijo, nekatere mikroorganizme, pa tudi za bolj grobe organizme, kot npr. školjke. Školjke prodirajo globoko v strukturo betona in lahko popolnoma uničijo zaščitni sloj betona nad armaturo. V beton ne prodirajo le z jemanjem snovi iz betona za svojo presnovo, temveč si pot v notranjost betona utirajo tudi z zelo visokofrekvenčnimi vibracijami.

Nekateri organizmi, ki za svojo presnovo potrebujejo žveplo, lahko povzročijo nastajanje sulfatov in žveploveene ter žveplaste kisline. Te načenjajo beton na osnovi prej opisanih procesov kemične korozije.

Vegetacija in mikroorganizmi načnejo s svojim delovanjem strukturo betona ter s tem prav tako znižujejo mehanske lastnosti betona. Korenine nekaterih rastlin in miceliji gob so prodrli skozi beton debeline 50 cm.

PROJEKTIRANJE IN ZAGOTAVLJANJE TRAJNOSTI – TRADICIONALNI PRISTOP

Splošno

V MC 90 /4/ so postavljene temeljne zahteve za projektiranje in zagotavljanje trajnosti betonskih konstrukcij:

“Betonske konstrukcije je treba projektirati, graditi in upravljati na tak način, da bodo ob pričakovanih vplivih okolja, ohranile varnost, uporabnost in sprejemljiv izgled in da stroški vzdrževanja in popravil v implicitno ali eksplicitno določenem času ne bodo nepredvidljivo visoki.”

Za izpolnitev teh zahtev je nujno sodelovanje štirih glavnih partnerjev pri graditvi konstrukcije:

- investitorja oz. naročnika, ki mora jasno in popolno opredeliti svoje zahteve po kakovosti in posebej glede trajnosti,
- projektanta, ki mora na podlagi zahtev in splošnih pravil stroke v okviru projekta izdelati tehnične pogoje za gradnjo,
- izvajalca, ki mora pri gradnji dosledno spoštovati postavljene pogoje,
- upravljalca, ki je odgovoren za redno vzdrževanje in pravočasno ugotavljanje in odpravljanje poškodb in napak.

Priporočila oz. smernice za zagotovitev trajnosti betonskih konstrukcij, ki jih vsebujejo sodobni tuji, zlasti pa novi evropski predpisi za betonske konstrukcije, obravnavajo vse najpogostejše mehanizme razpadanja betona. Pretežni del poškodb na betonskih konstrukcijah nastane zaradi korozije armature, zato je večina ukrepov namenjena zaščiti armature pred korozijo. Okoli jedra prereza je predvsem treba ustvariti čim bolj neprepusten ovoj in s tem podaljšati pot in čas prodiranja agresivnih medijev do armature. Iz tega sledi t.i. večstopenjska strategija zaščite, ki predvideva naslednje konkretne pogoje za doseganje pričakovane trajnosti oz. življenjske dobe armiranih konstrukcij:

1. zaščitni sloj betona nad armaturo mora imeti primerno debelino,
2. beton mora imeti predvideni agresivnosti okolja ustrezno nizko penetrabilnost, kar se doseže z ustreznimi osnovnimi materiali, s pravilno sestavo, dobro zgostitvijo in intenzivno nego svežega betona,
3. v zaščitnem sloju ne sme biti razpok širših od 0,3 mm,
4. z ustreznim oblikovanjem elementov konstrukcije je treba preprečiti zadrževanje vode na vodoravnih površinah,
5. dodatni in posebni zaščitni ukrepi v izjemno agresivnem okolju,
6. možnost opazovanja in vzdrževanja, pa tudi morebitne zamenjave elementov s krajšo projektirano življenjsko dobo.

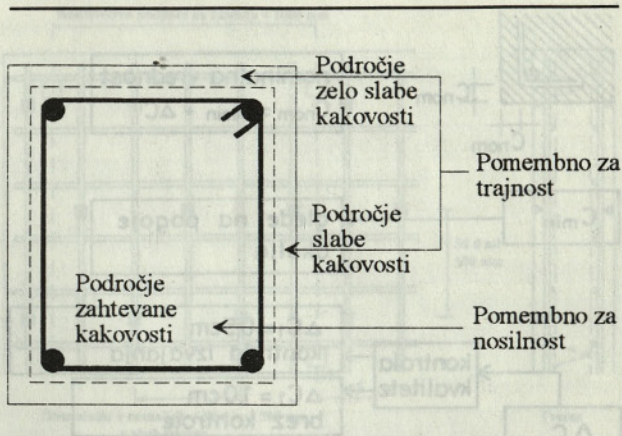
Zaščitni sloj nad armaturo

Kakovost betona v površinskem sloju

Za nosilnost kakega betonskega elementa sta odločilna prereza armature in betona znotraj nje, za njegovo trajnost in posebej za zaščito armature pred agresivnimi vplivi od zunaj pa sloj betona nad armaturo, t.i. zaščitni sloj (slika 20). Vsi agresivni vplivi, vključno s podnebjem in okoljem, delujejo na beton z zunanje strani. Trajnost betona je zato v prvi vrsti odvisna od lastnosti površine, oziroma od sestave in lastnosti površinskega sloja, v katerem je mogoče ločiti tri plasti:

- cementno skorjo – debeline približno 0,1 mm
- skorjo fine malte – debeline približno 4 mm
- betonsko skorjo – debeline približno 30 mm.

Kakovost betona površinskega sloja je slabša od betona v notranjosti elementa in od betona laboratorijskega vzorca. Razlogi za to so: učinek stene ob opažu, anizotropija betona, ki je posledica sedimentacije in segregacije po zgoščevanju, različni pogoji obdelave površine in



Slika 20. Shematični prikaz kakovosti betona zaščitnega sloja in betona znotraj armaturnega koša

različni pogoji negovanja. Posledice takih pojavov so večje variacije v/c vrednosti, razmerja agregat/cement (a/c), modula finosti agregata ter večja poroznost teh površinskih slojev v primerjavi z notranjostjo betona. Večja poroznost omogoča lažjo penetracijo agresivnih snovi iz zraka ali iz raztopin, prispeva pa tudi k povečanju raztezanja v pogojih zmrzovanja-odtaljevanja, posebej še pri uporabi soli za odtaljevanje.

Pri vsakem dodatnem posegu za izboljšanje odpornosti betonskega elementa, kot so impregnacije, zaščitni premazi in prevleke, je zato treba cementno, včasih pa tudi betonsko skorjo odstraniti.

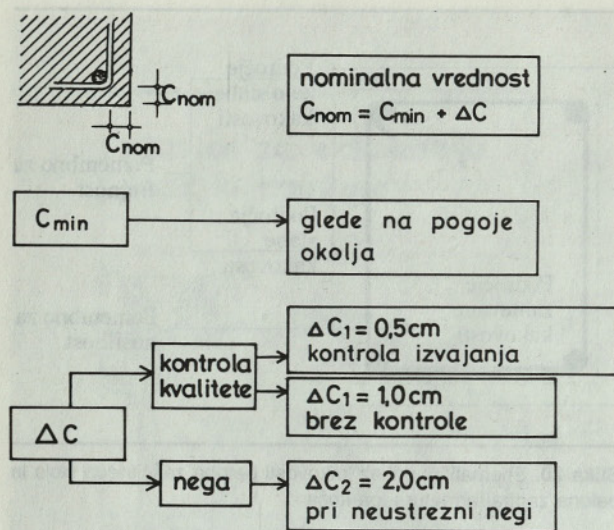
Debelina zaščitnega sloja

Predpisi za projektiranje armiranobetonskih konstrukcij določajo izkustvene minimalne debeline zaščitnega sloja nad armaturo, v odvisnosti od stopnje agresivnosti okolja.

V Sloveniji še veljavni jugoslovanski *Pravilnik za betonske in armiranobetonske konstrukcije* (skrajšano: PBAB) iz leta 1987 določa v 135. členu minimalne debeline zaščitne plasti za konstruktivne elemente, glede na stopnjo agresivnosti okolja, ki so opisane v 113. členu.

Modelni pravilnik za betonske konstrukcije CEB-FIP iz leta 1990 (skrajšano: MC 90) in *Eurocode 2* predpisujeta, v odvisnosti od stopnje izpostavljenosti, minimalne debeline zaščitnega sloja v razponu od 10 do 40 mm in dodatnih 5 do 10 mm glede na izvajano kontrolo kakovosti (slika 21).

Praksa je pokazala, da so v predpisih priporočene debeline zaščitnih slojev nad armaturo v zelo neugodnih okoljih celo premajhne. To velja zlasti za morsko okolje ali pri uporabi soli za odtaljevanje na cestah. V teh primerih bi bilo treba debelino zaščitnega sloja določiti na podlagi izračunane hitrosti penetracije agresivnih snovi, oziroma predpostavljenega mehanizma razpadanja betona, torej

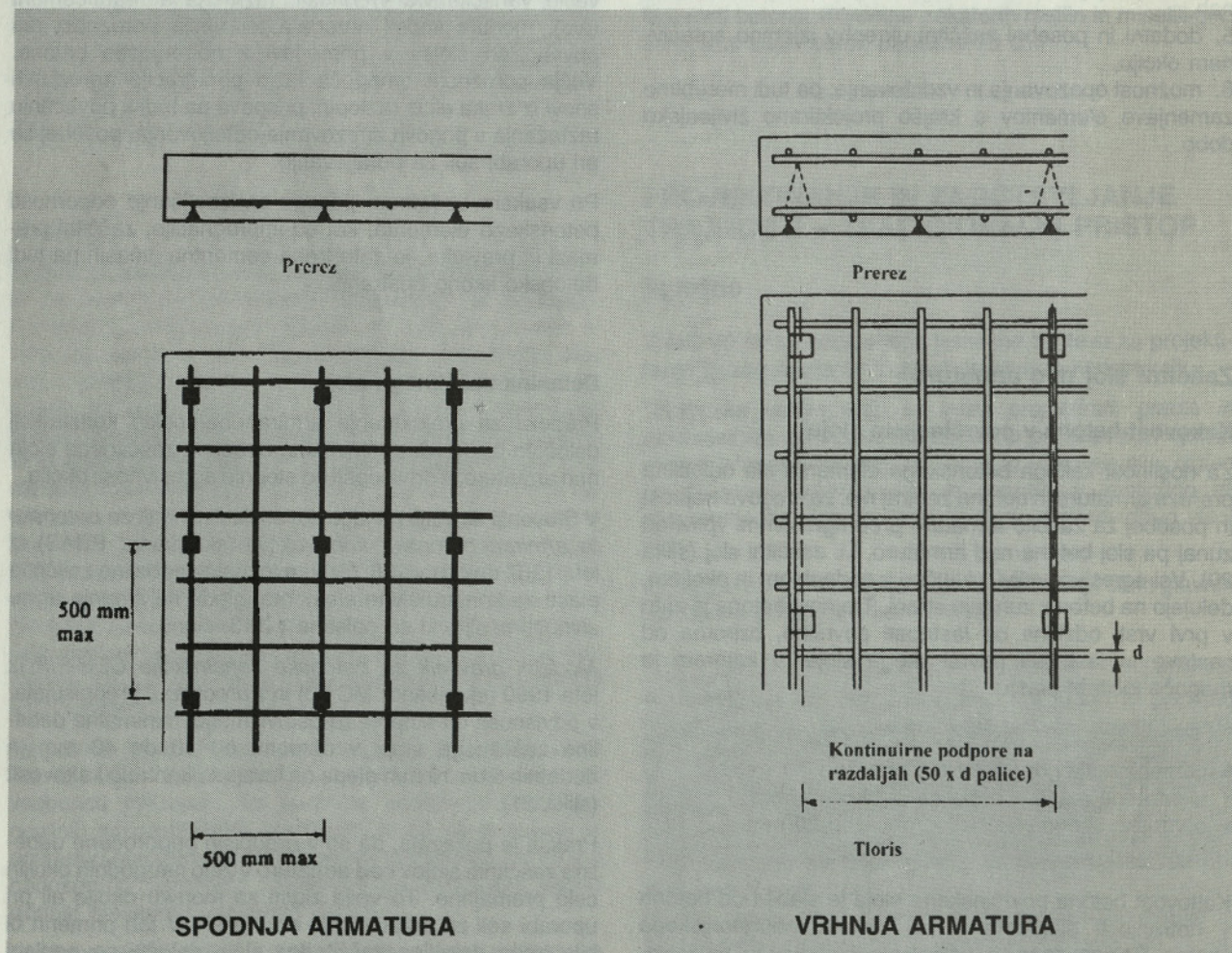


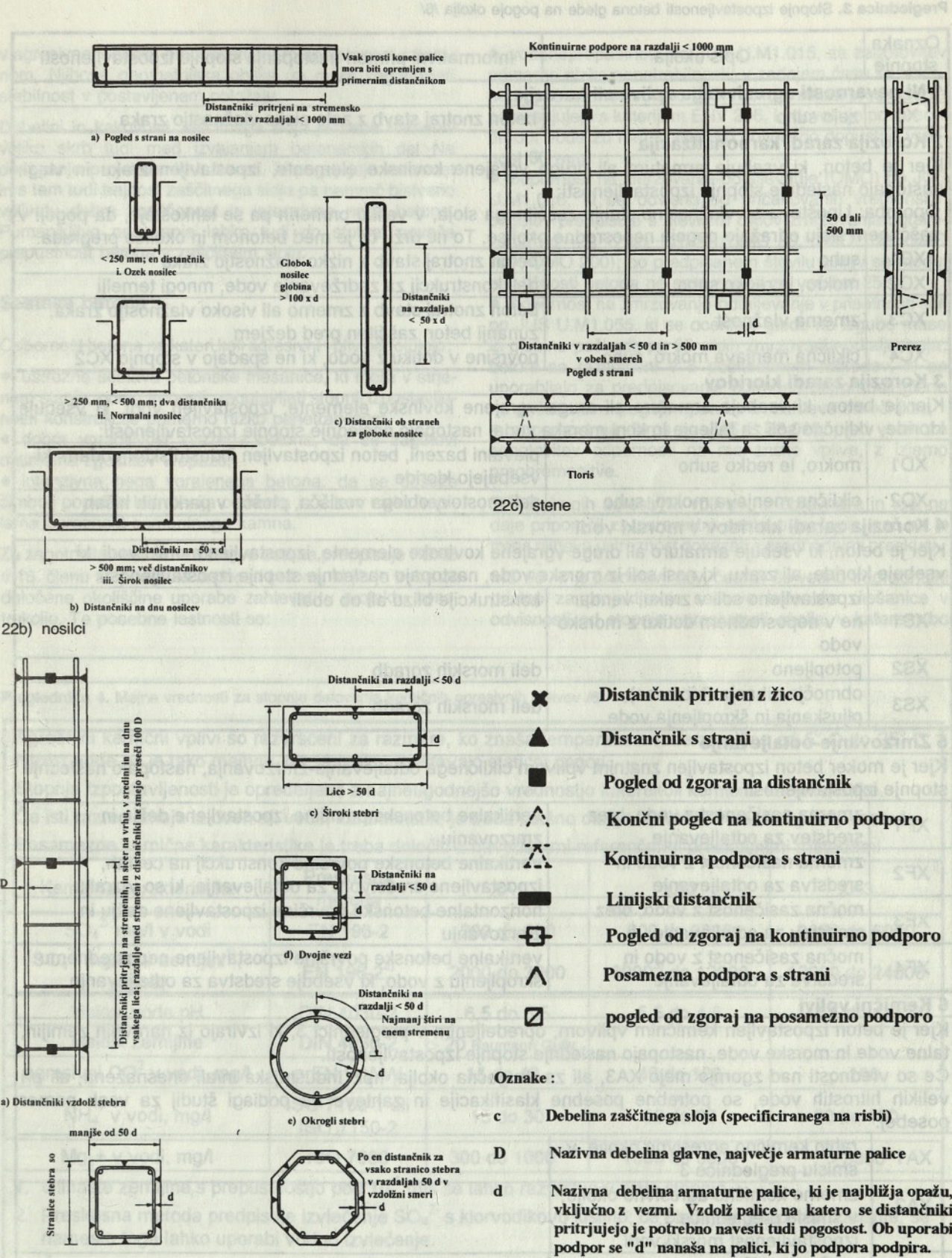
Slika 21. Potrebna debelina zaščitnega sloja po Eurocode 2

z uporabo inženirskega modela. Večja debelina zaščitnega sloja zagotavlja boljšo sprijemnost armature z betonom in boljšo zaščito pred požarom, omogoča pa tudi uporabo večjih frakcij agregata.

Zaščitni sloj tudi predstavlja primarno zaščito notranjih kablov za prednapenjanje, ki. Ti so dodatno zaščiteni v ceveh napolnjenih z injekcijsko maso.

Projektirano debelino zaščitnega sloja oz. razdaljo med armaturo in opazem je treba zagotoviti s postavitvijo podložk, distančnikov ali linijskih podstavkov na primernih razdaljah (slike 22a do 22d). Material distančnikov mora

Slika 22. Razporeditev podložk za različne vrste armiranobetonskih elementov
22a) plošče



22c) stebri

22d) legenda oznak

Preglednica 3. Stopnje izpostavljenosti betona glede na pogoje okolja /6/

Oznaka stopnje	Opis okolja	Informativni primeri nastopanja stopnje izpostavljenosti
1 Ni nevarnosti agresivnega vpliva ali korozije		
X0	zelo suho	beton znotraj stavb z zelo nizko vlažnostjo zraka
2 Korozija zaradi karbonatizacija		
Kjer je beton, ki vsebuje armaturo ali druge vgrajene kovinske elemente, izpostavljen zraku in vlagi, nastopajo naslednje stopnje izpostavljenosti: Opomba: Upošteva se vlažnostno stanje zaščitnega sloja, v veliko primerih pa se lahko šteje, da pogoji v zaščitnem sloju odražajo pogoje neposredne okolice. To ne drži, če je med betonom in okolice pregrada.		
XC1	suho	beton znotraj stavb z nizko vlažnostjo zraka
XC2	mokro, le redko suho	deli konstrukcij za zadrževanje vode, mnogi temelji
XC3	zmerna vlažnost	beton znotraj stavb z zmerno ali visoko vlažnostjo zraka, zunanji beton zaščiten pred dežjem
XC4	ciklična menjava mokro, suho	površine v dotiku z vodo, ki ne spadajo v stopnjo XC2
3 Korozija zaradi kloridov		
Kjer je beton, ki vsebuje armaturo ali druge vgrajene kovinske elemente, izpostavljen vodi, ki vsebuje kloride, vključno soli za taljenje in ki ni morska voda, nastopajo naslednje stopnje izpostavljenosti:		
XD1	mokro, le redko suho	plavalni bazeni, beton izpostavljen industrijskim vodam, ki vsebujejo kloride
XD2	ciklična menjava mokro, suho	deli mostov, obloga vozišča, plošče v parkirnih hišah
4 Korozija zaradi kloridov v morski vodi		
Kjer je beton, ki vsebuje armaturo ali druge vgrajene kovinske elemente, izpostavljen morski vodi, ki vsebuje kloride, ali zraku, ki nosi soli iz morske vode, nastopajo naslednje stopnje izpostavljenosti		
XS1	izpostavljeno soli v zraku, vendar ne v neposrednem dotiku z morskovo vodo	konstrukcije blizu ali ob obali
XS2	potopljeno	deli morskih zgradb
XS3	območja nihanja (bibavice), pljuskanja in škropljenja vode	deli morskih zgradb
5 Zmrzovanje-odtaljevanje		
Kjer je moker beton izpostavljen znatnim vplivom cikličnega odtaljevanja-zmrzovanja, nastopajo naslednje stopnje izpostavljenosti		
XF1	zmerna nasičenost z vodo, brez sredstev za odtaljevanje	vertikalne betonske površine izpostavljene dežju in zmrzovanju
XF2	zmerna nasičenost z vodo in sredstva za odtaljevanje	vertikalne betonske površine konstrukcij na cestah, izpostavljene sredstvom za odtaljevanje, ki so v zraku
XF3	močna zasičenost z vodo, brez sredstev za odtaljevanje	horizontalne betonske površine izpostavljene dežju in zmrzovanju
XF4	močna zasičenost z vodo in sredstva za odtaljevanje	vertikalne betonske površine izpostavljene neposrednemu škropljenju z vodo, ki vsebuje sredstva za odtaljevanje
6 Kemični vplivi		
Kjer je beton izpostavljen kemičnim vplivom, opredeljenim v preglednici 3, ki izvirajo iz naravnih zemljin, talne vode in morske vode, nastopajo naslednje stopnje izpostavljenosti. Če so vrednosti nad zgornjo mejo XA3, ali za drugačna okolja, npr. Industrijska in/ali onesnažena, ali pri velikih hitrostih vode, so potrebne posebne klasifikacije in zahteve na podlagi študij za vsak primer posebej.		
XA1	rahlo kemično agresivno okolje, v smislu preglednice 3	
XA2	zmerno kemično agresivno okolje, v smislu preglednice 3, izpostavljenost morski vodi	
XA3	močno kemično agresivno okolje, v smislu preglednice 3	

v agresivnem okolju omogočati dobro sprijemnost z betonom. Njihova geometrijska oblika pa mora zagotavljati stabilnost v postavljenem položaju.

Debelini in kakovosti zaščitnega sloja je treba nameniti veliko skrb tudi med izvajanjem betonarskih del. Na doseganje projektiranih lastnosti, ki pogojujejo kakovost in s tem tudi trajnost zaščitnega sloja pa namreč bistveno vplivata dobra zgoščenost in intenzivna nega betona. Pomanjkljivo negovanje lahko tudi do stokrat poveča prepustnost betona v zaščitnem sloju.

Sestava betona

Odpornost betona na kateri koli agresivni vpliv pogojujejo:

- ustrezna sestava betonske mešanice, ki mora v strjenem stanju, poleg trdnosti, zagotavljati stopnji izpostavljenosti konstrukcije primerno nizko penetrabilnost,
- dobra vgradljivost svežega betona, da se zagotovi optimalna zgostitev v opažu,
- intenzivna nega vgrajenega betona, da se doseže čimbolj popolna hidratacija cementa in s tem nizka kapilarna poroznost cementnega kamna.

Za zagotovitev ustrezne sestave betona predpisuje PBAB v 16. členu t.i. *posebne lastnosti betona*, ki jih je treba za določene okoliščine uporabe zahtevati v projektu konstrukcije. Te posebne lastnosti so:

- vodoneprepustnost po JUS U.M1.015, za zagotovitev primerno nizke penetrabilnosti; v zadnjem času se vodoneprepustnost določa po ISO 7031, rezultati preskušanja pa ocenjujejo s kriterijem ENV 206, ki dovoljuje povprečni prodor vode 20 mm in najvišjo dovoljeno dopustno vrednost 50 mm,
- odpornost na zmrzovanje-odtaljevanje (OMO) po JUS U.M1.016, ki se odvisno od pričakovanih vremenskih pogojev predpisuje s številom ciklov zmrzovanja-odtaljevanja od -20°C do $+20^{\circ}\text{C}$ (OMO 50, OMO 100, OMO 150, OMO 200); po predpisanem številu ciklov se modul elastičnosti betona ne sme znižati za več kot 25%,
- odpornost na zmrzovanje-odtaljevanje v prisotnosti soli po JUS U.M1.055, ki se ocenjuje glede na izgubo mase in globino poškodb po 25 ciklih zmrzovanja-odtaljevanja; betoni so razvrščeni v 5 poškodbenih razredov, ki se uporabljajo za predpisovanje potrebne odpornosti glede na pričakovane pogoje uporabe in zahteve naročnika,
- odpornost na obrus po JUS B.B8.015, pred vsem za zagotovitev odpornosti na mehanske vplive, z izjemo preobremenitve.

PBAB drugih agresivnih vplivov ne obravnava in tudi ne daje priporočil za parametre sestave mešanic, pač pa je treba njihovo ustreznost dokazati s predhodnimi preskusi.

MC 90 /4/ je predstavil nov, čeprav še vedno tradicionalni pristop za projektiranje sestave betonske mešanice v odvisnosti od stopnje agresivnosti okolja, v katerem bo

Preglednica 4. Mejne vrednosti za stopnje delovanja kemičnih agresivnih vplivov /6/

Agresivni kemični vplivi so razvrščeni za razmere, ko znaša temperatura vode/zemljine od 5°C do 25°C , hitrost vode pa je tako majhna, da se lahko upoštevajo statični pogoji.

Stopnja izpostavljenosti je opredeljena z najneugodnejšo vrednostjo katerekoli kemične karakteristike.

Če isti razred izhaja iz dveh ali večih karakteristik, je treba takšno okolje razvrstiti v naslednji višji razred.

Posamezne kemične karakteristike je treba določiti z navedenimi referenčnimi preskusnimi metodami

Kemična karakteristika	Preskusna metoda	XA1	XA2	XA3
SO_4^{2-} mg/l v vodi	EN 196-2	200 do 600	600 do 3000	3000 do 6000
SO_4^{2-} mg/kg v zemljini ¹⁾ , skupaj	EN 196-2 ²⁾	2000 do 3000	3000 ³⁾ do 12000	12000 do 24000
kislost vode pH	DIN 4030-2	6,5 do 5,5	5,5 do 4,5	4,5 do 4,0
kislost zemljine	DIN 4030-2	> 20 Baumann Gully		
agresivni CO_2 v vodi, mg/l	prEN WWW	15 do 40	40 do 100	> 100
NH_4^+ v vodi, mg/l	ISO 7150-1 ali ISO 7150-2	15 do 30	30 do 60	60 do 100
Mg_2^+ v vodi, mg/l	ISO 7980	300 do 1000	1000 do 3000	> 3000

1. Glinaste zemljine s prepustnostjo pod 10^{-5} m/s se lahko razvrstijo v nižjo stopnjo.

2. Preskusna metoda predpisuje izvlečenje SO_4^{2-} s klorovodikovo kislino; če obstajajo zadostne izkušnje, se namesto tega lahko uporabi vodno izvlečenje.

3. Če obstaja nevarnost akumuliranja sulfatnih ionov v betonu zaradi cikličnega sušenja in močenja ali kapilarnega sesanja, je treba mejo 3000 mg/kg znižati na 2000 mg/kg.

konstrukcija med uporabo. Ta pristop je v dopolnjeni obliki prevzel tudi *Eurocode 2* /5/, oz. evropski standard *prEN 206: Beton. Lastnosti, proizvodnja in skladnost* /6/.

Slednji za ta namen določa:

- stopnje izpostavljenosti betona v različnih pogojih mikro okolja, ki neposredno obdaja obravnavani betonski element okolja (preglednici 3 in 4),
- za vsako stopnjo izpostavljenosti: minimalne tehnološke zahteve oz. parametre mešanice za določitev ustrezne sestave betona (preglednica 5), in sicer:
 - maksimalno dovoljeno dopustno v/c razmerje, za zagotovitev primerno nizke penetrabilnosti,
 - minimalno potrebno količino cementa za zagotovitev dobre vgradljivosti,
 - minimalno vsebnost mikropor (aeriranje) za zagotovitev zmrzlinke odpornosti,
 - posebne zahteve za vrsto cementa in agregata, kjer je to pomembno.

Vrednosti v preglednici 5 veljajo za agregate z maksimalnim zrnom od 20 do 32 mm in cement vrste CEM I po EN 197-1. (PC-35)

Obvezno je treba predpisati maks. V/c razmerje in min. količino cementa, dodatno pa se lahko predpiše tudi minimalna MB.

čati vsaj na 6 %. Odpornost na zmrzovanje je možno doseči tudi brez aeriranja, z močnim zmanjšanjem v/c vrednosti, kar pa je že področje t.i. visokovrednih betonov.

Pogoj za doseganje pričakovane odpornosti na zmrzovanje-odtaljevanje ni le ustrezna sestava betona in kakovostna nega, ampak tudi določena stopnja osušitve betona pred nastopom nizkih temperatur, zlasti pa pred začetkom soljenja. Mladi beton se ne sme izpostaviti mrazu, dokler ne doseže vsaj 5 MPa tlačne trdnosti.

Razpoke

Razpoke omogočajo hitrejši vstop agresivnih snovi v notranjost prereza konstrukcije. Na mestu razpoke kateri koli proces razpadanja betona poteka pospešeno. To tveganje je treba čim bolj zmanjšati in s tehnološkimi in/ali projektantskimi ukrepi odpraviti vzroke za nastanek razpok.

Za ugotovitev vzrokov so pomembni naslednji podatki o razpoki:

- čas nastanka,
- mesto oz. položaj na konstrukciji, in
- pojavna oblika: bolj ali manj ravna črta ali vzorec

Preglednica 5. Priporočila za izbiro osnovnih parametrov sestave betona in lastnosti betona za posamezne stopnje izpostavljenosti /6/

Stopnje izpostavljenosti agresivnim vplivom																	
Parameter sestave	Ni	Karbonatizacija				Kloridi					Zmrzovanje - odtaljevanje				Kemični vplivi		
						v morski vodi		drugi									
	X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3
max v/c		0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,45	0,50	0,45	0,55	0,55	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45
min MB	15	25	30	35	40	35	40	45	40	45	35	30	35	40	35	40	45
min. količ. cementa , kg/m ³		260	280	280	300	300	320	340	300	320	300	300	320	340	300	320	360
min.vsebn. zraka %												4,0	4,0	4,0			
druge zahteve											agregat odporen na zmrzovanje- odtaljevanje					sulfatno odporen cement ¹⁾	

¹⁾ Sulfatno odporni cement je treba uporabiti, če kemična agresivnost izhaja iz prisotnosti SO₄²⁻.

¹⁾ Sulfatno odporni cement je treba uporabiti, če kemična agresivnost izhaja iz prisotnosti SO₄²⁻.

Za izdelavo betonov odpornih na zmrzovanje-odtaljevanje je treba uporabiti zmrzlinsko odporen agregat, pri predvideni močni nasičenosti z vodo in prisotnosti sredstev za odtaljevanje (XF3 in XF4) pa je koristno uporabiti cemente z dodatki žilindre in/ali pucolanov (elektrofilterjski pepel, mikrosilika). V preglednici 5 navedene minimalne vsebnosti zraka v svežem betonu je treba za neposredno ogrožene in nezaščitene konstruktivne elemente (npr. varnostne ograje, robne vence, hodnike na mostu) pove-

(npr. mreža), po vsej dolžini približno enaka ali pa spremenljiva širina, globina.

Na sliki 23 so sistematizirane vrste razpok in glavni vzroki za njihov nastanek, v preglednici 6 pa tudi nekatere druge njihove najpomembnejše značilnosti, po katerih jih je možno prepoznati in določiti glavne in stranske vzroke nastanka.

Razpoke zaradi plastičnega krčenja in plastičnega pose-

danja se pojavljajo zlasti na večjih vodoravnih, neopaženih površinah. Nastanejo, če voda s površine prehitro izpareva (več kot 1 l/m²/h), kar se dogaja zlasti v kateri koli kombinaciji pogojev toplega vremena:

- visoka temperatura zraka,
- visoka temperatura betona,
- nizka relativna vlažnost zraka in
- velika hitrost vetra.

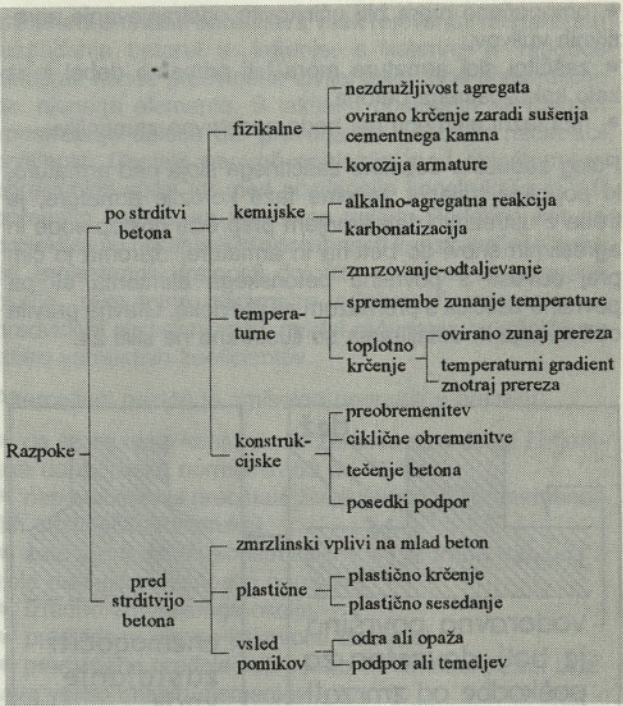
Te razpoke je treba preprečiti s pravočasno in učinkovito nego in zaščito pred vetrom, če pa so že nastale, jih je takoj po nastanku še možno zapreti z revibriranjem.

Razpoke zaradi preobremenitve oz. poddimenzioniranosti preseka prereza konstrukcije ali zaradi vsiljenih deformacij ne zmanjšujejo uporabnosti in trajnosti konstrukcije, če so njihove širine pod sprejemljivo mejo 0,3 mm.

Oblikovanje AB elementov, ki so izpostavljeni agresivnemu okolju

Za oblikovanje elementov veljajo naslednja osnovna izhodišča:

- razmerje med izpostavljeno površino betona in njegovo prostornino mora biti čim manjše,
- voda na površini elementa ne sme zastajati,



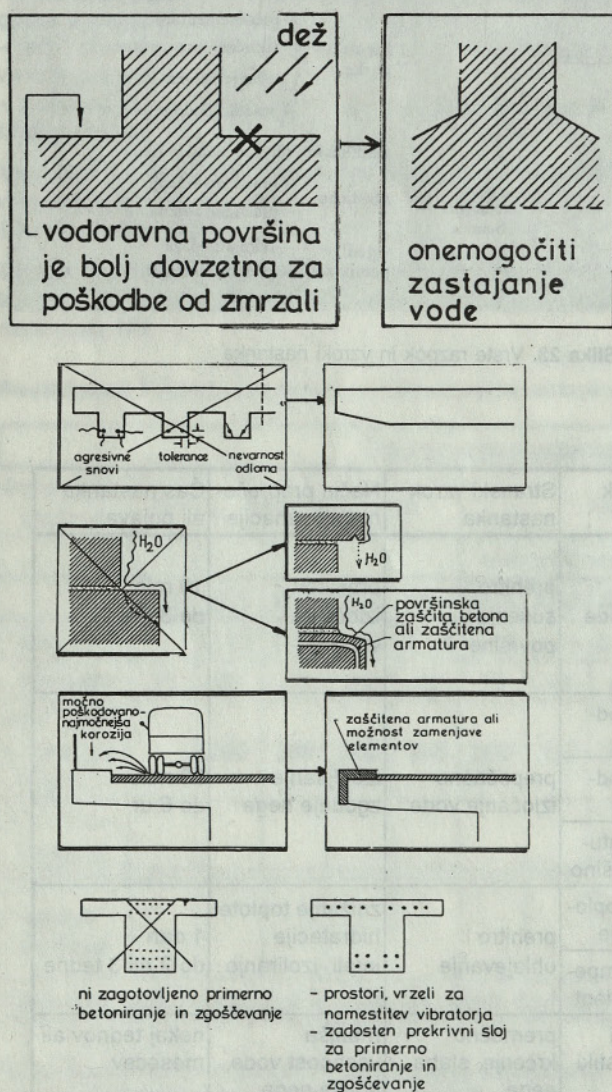
Slika 23. Vrste razpok in vzroki nastanka

Preglednica 6. Vrste razpok in njihove značilnosti

Tip razpoke	Dodatna označba razpoke	Najbolj običajna lokacija	Glavni vzrok nastanka	Stranski vzrok nastanka	Način preprečenja ali sanacije	Čas nastanka ali pojava
plastično posedanje betona	nad armaturnimi palicami	visoki prerezi	premočno izločanje vode	prehitro sušenje površine	omejitev izločanja vode	10 min do 3 ure
	usločene oblike	vrh stebrov				
	spremenjena debelina prereza	koritaste in kasetirane plošče				
plastično krčenje betona	diagonalna	voziščne plošče in tlaki	prehitro zgodnje sušenje	prepočasno izločanje vode	izboljšanje zgodnje nege	30 min do 6 ur
	naključna	armirane betonske plošče	prehitro zgodnje sušenje			
	nad armaturnimi palicami	armirane betonske plošče	isto in armatura pod površino			
zgodnje toplotno krčenje	ovirano krčenje - zunanje	debeli zidovi	previsoka toplota hidratacije	prehitro ohlajevanje	znižanje toplote hidratacije in/ali izoliranje	1 dan do 2 ali 3 tedne
	ovirano krčenje - notranje	debeli bloki	previsok temperaturni gradient			
dolgotrajno izsuševalno krčenje		tanke plošče ali stene	neučinkoviti dilatacijski stiki	premočno krčenje, slaba nega	manjša vsebnost vode, boljša nega	nekaj tednov ali mesecev
mrežaste razpoke	opažena površina		neprepusten opaz	prebogata mešanica	sprememba mešanice, izboljšanje nege in obdelave	1 do 7 dni včasih mnogo kasneje
	zaribana površina	plošče	premočno zaribavanje	nezadostna nega		
korozija armature	običajna in kloridna	povsod	neustrezen zaščitni sloj	slaba kakovost betona	izboljšanje zaščitnega sloja	več kot 2 leti

- omogočeno mora biti učinkovito odstranjevanje agresivnih vplivov,
- zaščitni sloj armature mora biti primerno debel in iz zelo kakovostnega betona,
- montažni elementi naj bodo enostavno zamenljivi.

Poleg zadostne debeline zaščitnega sloja nad armaturo, ki pogojuje trajanje začetne faze korozije armature, je treba z ustreznim detajliranjem preprečiti dostop vode in agresivnih snovi do betona in armature, oziroma jo čim prej odvesti s površine betonskega elementa ali pa površino zaščititi s premazom ali prevleko. Glavna pravila oblikovanja in detajliranja so ilustrirana na sliki 24.



Slika 24. Oblikovanje prereзов in armaturnih detajlov

Oblika prereza naj bo čimbolj robustna, k čemur šteje tudi primerna debelina zaščitnega sloja. Površine, izpostavljene direktnemu delovanju agresivnega okolja, morajo biti čim manjše. Zato ima polni prerez prednost pred

T-prerezom ali podobno razčlenjeno konstrukcijo, s katero bi se sicer lahko "prihranilo" nekaj betona.

Vogali naj bodo po možnosti zaobljeni, da se onemogoči prodiranje agresivnih snovi proti vogalni armaturi z dveh strani. S tem se namreč povečuje njihova koncentracija, ki lahko tudi pospeši depasivizacijo. To je poznani vogalni učinek in se pri povečanju prostornine korodirane armature zaščitni sloj tam najprej odlomi.

Voda od dežja, talečega se snega ali ledu in iz odtočnih cevi ne sme odtekat po nezaščitenem betonu in čez nezaščitene stike. Vлага se akumulira zlasti v prahu in umazaniji, ki se zadržujeta v vogalih izpostavljenih vodoravnih in pokončnih površin. Mehka voda izpira beton, če pa so v njej raztopljene agresivne kemične snovi, ali če vsebuje kloride, pa lahko pride do razpadanja betona oziroma, če je beton izpostavljen zmrzovanju-odtaljevanju v prisotnosti talilnih soli, do luščenja površine in do korozije armature.

Na površinah, ki naj bi bile skoraj ravne, voda ne sme zastajati. Zato jo je treba z balkonov, zlasti pa z izpostavljenih ravnih površin na mostovih in v parkirnih hišah, čim hitreje odvajati z učinkovitim drenažnim sistemom.

Fasade naj bodo čimbolj gladke, da je odtekanje vode po njih hitrejše. Široki napušči, ki se iz neutemeljenih razlogov opuščajo, dajejo stavbam zelo učinkovito zaščito pred dežjem. Podobno vlogo zaščite glavnih nosilcev mostu ima previsni del voziščne plošče pod hodniki.

Dele konstrukcije, ki so ogroženi zaradi neposrednega škropljenja slane vode, je koristno dodatno zaščititi. Voziščno ploščo mostov in vozne površine v garažnih parkirnih hišah je treba obvezno zaščititi z bitumensko ali poliuretansko hidroizolacijo, opornike v morju, opornike nadvozov, hodnike in zaščitne ograje na vozišču mostov pa z ustreznim premaznim sistemom. Tam, kjer se ni mogoče izogniti dolgotrajnejšemu agresivnemu delovanju, je koristno predvideti montažne elemente, ki se lahko v primeru dotrajanosti enostavno zamenjajo.

V vseh zaprtih oziroma votlih delih konstrukcijskih elementov je treba z učinkovitim odvodnjavanjem in prezračevanjem preprečiti nekontrolirano zbiranje vode in nasičenje betona, ki lahko privede do zmrzlinjskih poškodb.

Na mestih hitrih sprememb prereza in/ali nenadne spremembe poteka silnic nastanejo zaradi koncentracije napetosti razpoke, ki se jim je treba izogniti s ustreznim oblikovanjem in armiranjem prereza. S pravilnim detajliranjem konstrukcije in armature je treba preprečiti tudi večje razpoke, ki lahko nastanejo zaradi:

- koncentriranih sil pri sidranju prednapetih kablov,
- oviranega krčenja sten na prej betonirani temeljni peti in
- diferenčnih posedkov.

Palice zgornje armature v ploščah in nosilcih je treba razporediti tako, da zaradi njihovega premajhnega medsebojnega razmaka ni onemogočeno vstavljanje vibratorjev, s tem pa dobro zgoščevanje betona pod to armaturo. Skozi pregosto postavljene palice se beton presejava in nastopi neka vrsta segregacije. Na eni strani ostanejo

groba zrna s premalo cementne paste, v zaščitni sloj pa se vgradi s cementom bogati drobnnozrnati del mešanice, ki je občutljiv na krčenje.

Dodatni in posebni zaščitni ukrepi

Ti pridejo v poštev, kadar v posebno agresivnih okoljih z normalnimi ukrepi ni mogoče zagotoviti zahtevane trajnosti. Možni dodatni ukrepi so:

- povečanje debeline zaščitnega sloja; če je ta večja od 60 mm, je treba zaščitni sloj armirati;
- toplotna izolacija na fasadah, da se zmanjšajo vplivi sprememb temperature in vlage;
- zelo gladka površina, da se omogoči hitrejšo odvajanje vode;
- impregnacije in premazi površine betona;
- epoksidna prevleka armature,
- katodna zaščita armature;
- opazovalni sistemi napredovanja korozije.

Dodatna zaščita površine betona

Za dodatno zaščito betona pred prodiranjem vode in škodljivih raztopin obstoji vrsta materialov v obliki hidroforiranih premazov oz. impregnacij (snovi, ki penetrirajo v površinski sloj betona in s tem povečujejo njegovo neprepustnost), vodoodbojnih premazov, vodoneprepustnih tankoslojnih in debeloslojnih premazov ter premaznih sistemov na osnovi akrilatov in epoksidov, ki preprečujejo vstop agresivnih tekočin in plinov (zlasti Cl^- ionov in CO_2), dovoljujejo pa izparevanje vode iz kapilarnih por. Tako v njih ne pride do kritične nasičenosti in do poškodb betona zaradi zmrzali. S premazom ali impregnacijo je treba dodatno zaščititi vse vodi izpostavljene površine, ker bi sicer zaradi kapilarnega dviganja vode, pod ostalimi zaščitnimi površinami prišlo do nasičenja betona in bi tam pri nizkih temperaturah zmrzlinsko premalo odporen beton zmrznil.

Zaščitni premazi in premazni sistemi niso trajni, ampak pomenijo časovno omejen ukrep. Zato jih je treba redno opazovati in sproti obnavljati. S premazom tudi ni mogoče v celoti nadoknaditi morebitne nezadostne debeline ali slabe kakovosti zaščitnega sloja betona.

V preglednici 7 so za vsako vrsto zaščitnega premaza podane njegove najpomembnejše značilnosti in pričakovani učinki.

PROJEKTIRANJE TRAJNOSTI IN DOLOČANJE ŽIVLJENJSKE DOBE – ALTERNATIVNI PRISTOP

Splošno

Alternativno racionalistično ali inženirsko projektiranje trajnosti armiranobetonskih konstrukcij je metoda, ki na

kvantitativen način obravnava vsak relevantni mehanizem razpadanja betona in kriterije, s katerimi je mogoče definirati konec predvidene življenjske dobe konstrukcije oz. njenega elementa. S takšnim pristopom se trajnost konstrukcije določa oz. preverja na podoben način kot nosilnost. Obstaja namreč analogija med obtežbami in agresivnimi vplivi ter med nosilnostjo konstrukcije in odpornostjo betona na agresivne vplive. Podobno kot pri projektiranju nosilnosti in uporabnosti konstrukcije je treba pri projektiranju trajnosti določiti: obtežbe agresivnega okolja, relevantne parametre odpornosti materiala na predvideni agresivni vpliv, model računanja in kriterije za izbiro varnostnih koeficientov.

Alternativni pristop je smiselno uporabiti v primeru:

- da se za novo konstrukcijo zahteva zelo dolga življenjska doba, preko normalnih 50 do 75 let,
- napovedovanja preostale življenjske dobe pomembnejših obstoječih konstrukcij,
- zelo pomembnih konstrukcij, ki jih je treba računati z zelo majhno verjetnostjo porušitve,
- izredno agresivnega okolja,
- predvidene visoke kakovosti izdelave,
- predvidene gradnje več podobnih konstrukcij oz. izdelave veliko enakih elementov.

Pri nameravani uporabi katerekoli od opisanih alternativnih metod za neko vrsto in obliko konstrukcije, je treba predhodno definirati:

- obliko konstrukcije,
- lokalne pogoje okolja oz. pričakovane ali ugotovljene agresivne vplive,
- predvideni ali ugotovljeni prevladujoči (dominantni) mehanizem razpadanja betona,
- predvidene ali ugotovljene lastnosti betona,
- stopnjo kakovosti izdelave,
- zahtevano življenjsko dobo za novo konstrukcijo.

Inženirske modele, ki so bili razviti v zadnjih 10 letih, lahko razdelimo v empirične obrazce, fizične modele in analitične modele.

Empirični obrazci

Ta vrste obrazci predstavljajo prehod od tradicionalnega k alternativnemu pristopu.

Pristop temelji na dolgoletnih izkušnjah z lokalnimi materiali in postopki gradnje ter podrobnem poznavanju lastnosti betona v pričakovanih agresivnih pogojih okolja. Spremenljivke v teh izrazih, npr. v/c razmerje, vrsta in količina cementa, običajno vzpostavljajo korelacijo med sestavo in lastnostmi materiala ter med laboratorijskimi preskusi in prakso. Na podlagi obširnih preskusov se ponavadi izpeljejo empirične enačbe ali diagrami ali pa se opredelijo omejitveni kriteriji. Dobljeni podatki navadno veljajo za preiskovano področje in zato takšnih empiričnih enačb ni mogoče posploševati.

Preglednica 7. Vrste in učinkovitost zaščitnih premazov in sistemov /7/

Oznaka sistema	A H-P hidrofobirni premazi	B T-P tankoslojni premazi	C T-PS tankoslojni premazni sistemi	D D-P ¹⁾ debeloslojni premazi	E D-PS ¹⁾ debeloslojni premazni sistemi
debelina	-	od 80 µm do 300 µm		> 300 µm	2000 µm
izvedba	2 × obrizg	osnovni P 2 × T-P	glajenje osnovni P 2 × T-Pe	glajenje izravna osnovni P min. 2 × D-P	glajenje osnovna obloga osnovni P min 2 × D-Pe
snovna sestava	silani, silikonske smole	eno-in/ali dvokomponentni premazi brez topil: akrilati, mešani polimerizati, epoksidi, poliuretani		polimerno cementni premazi, polimerne disperzije, dvokomponentni poliuretani, modificirane epoksidne smole	
namen in mesto uporabe	delna zaščita vidnega betona	izboljšanje videza, oviranje karbonatizacije zaščita pred slanim prščem, zaščita pred zmrzovanjem		obnova in tesnenje površine, zaščita pred zmrzovanjem in pred agresivnimi raztopinami, boljša korozijska zaščita jekla	
učinki ²⁾					
izboljšanje videza	-	x	x	xx	
znižanje vodovpojnosti	x	x	x	x	x
ovira prodoru kloridov	x	-/x	x	x	x
ovira karbonatizacije	-	-/x	x/-	x	x
visoka paroprepustnost	x	x	x	-	-
dober oprijem		x	x	x	x
premostitev razpok		-	x	D-Pe	D-PSe
zaščita pred zmrzovanjem		-/x	x	x	x

¹⁾ togi: D-Pt, D-PSt
deformabilni: D-Pe, D-PSe

²⁾ legenda učinkov - ni x je x/- in -/x delno

Primer praktičnega empiričnega obrazca je Clearov model, ki je rezultat večletnega opazovanja velikega števila poskusnih plošč, preliti z 2%-no raztopino kloridov, dokler se ni na armaturi pojavila korozija. Ta čas se šteje za življenjsko dobo:

$$SL = \frac{129}{v/c} \times \frac{c^{1,22}}{CI^{0,42}}$$

kjer posamezne oznake pomenijo:

SL – življenjska doba (*service life*) v letih,

v/c – vodocementno razmerje betona,

c – debelina zaščitnega sloja v cm,

CI – vsebnost klorovih ionov v betonu (ut.%)

Fizični modeli

Pri tem postopku je treba skrbno zasnovati in paralelno, v laboratoriju in in-situ, izvesti preskuse predvidenih procesov razpadanja. Življenjska doba se oceni na podlagi primerjave enih in drugih rezultatov. Ta postopek je v prvi vrsti namenjen ocenjevanju obnašanja novih materialov ali pa tradicionalnih materialov v novem ali še neznanem okolju. Model dovoljuje iterativnost v procesu raziskave in se z napredovanjem raziskav lahko povečuje zanesljivost napovedi življenjske dobe.

Predpogoj za uspešno izpeljavo teh postopkov je poznavanje bistvenih mehanizmov razpadanja materiala, ki odločilno vplivajo na njegovo trajnost in strokovne, inženirske izkušnje ocenjevalca. Za analizo je namreč treba

izbrati in meriti tiste lastnosti, ki najbolj razvidno pokažejo spremembe v materialu.

Predstavnik te vrste modelov je skupni predlog tehničnih odborov CIB W80 in RILEM 71 – PSL.

Analitični modeli

To je najbolj aktualen pristop, ki mu danes v strokovnih krogih namenjajo največ pozornosti. Uporablja se pri projektiranju trajnosti novih konstrukcij, kakor tudi za ocenjevanje preostale življenjske dobe obstoječih konstrukcij. Gradbeni strokovnjak, ki se s temi problemi ukvarja, mora še posebej dobro poznati mehanizme razpadanja betona.

Modeli so izpeljani iz osnovnih naravnih zakonitosti. Slo-nijo na matematičnem opisu fizikalnih in kemičnih procesov pri razpadanju betona in koroziji armature s pomočjo nekaterih osnovnih naravnih zakonov. Teoretično je ta pristop enostaven, pri prenosu v prakso pa je še veliko nerešenih problemov v zvezi z definiranjem relevantnih parametrov heterogenosti in poroznosti strukture betona na eni, ter kompliciranega delovanja zunanjih agresivnih vplivov na drugi strani. Zaradi poenostavitve matematičnega modela je treba sprejeti nekatere aproksimacije parametrov materiala in pogojev okolja, kar gre v škodo natančnosti napovedi verjetne življenjske dobe. Pri vsakem modelu je treba opredeliti:

- glavne parametre zunanje obremenitve in odpornosti betona za pričakovani mehanizem razpadanja,
- kriterij sprejemljive poškodovanosti betona in armature pri še zadostni varnosti konstrukcije.

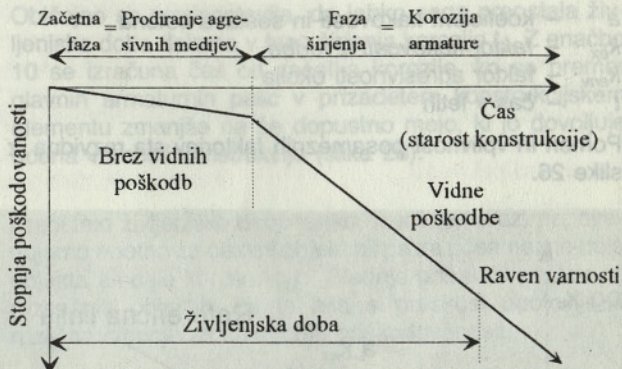
Vsak proces razpadanja betona zahteva svoj model določanja življenjske dobe konstrukcije. Največ pozornosti, tako s tehničnega, kakor tudi gospodarskega vidika, se v raziskavah namenja problemu korozije armature, ker je z njo bolj ali manj povezana večina problemov razpadanja betonskih konstrukcij. Na zadovoljlivi inženirski ravni obstajajo takšni modeli le za korozijo armature v pretežno stacionarnem okolju, npr. na objektih v morskem okolju. Nekateri modeli se pripravljajo (npr. za zmrzovanje-odtaljevanje), o ostalih pa se šele razmišlja.

V nadaljevanju so kratko opisane bistvene značilnosti tega pristopa pri obravnavanju korozije armature zaradi kloridov in zaradi karbonatizacije.

ANALITIČNI MODELI PROJEKTIRANJA TRAJNOSTI IN NAPOVEDOVANJA ŽIVLJENJSKE DOBE ZA KOROZIJO ARMATURE

Splošno

Model računanja življenjske dobe armirane betonske konstrukcije za korozijo armature temelji na predpostavki, da sestoji proces korozije iz dveh faz (slika 25):



Slika 25. Značilne faze procesa korozije armature

- začetne (inicijalne) faze t_1 , ko se ustvarjajo pogoji za depasivacijo armature, bodisi zaradi napredovanja karbonatizacije, ali zaradi prodiranja Cl^- ionov proti položeni armaturi,
- faze širjenja (propagacije) aktivne korozije t_2 po armaturi, z različno intenziteto in hitrostjo.

Prvo fazo je mogoče opisati z ustreznim fizikalnim zakonom penetracije agresivnega plina (CO_2 v primeru karbonatizacije) ali agresivne tekočine (s Cl^- ioni nasičene vode) v strukturo betona, običajno kot difuzijo plina ali tekočine, vpijanje ali tečenje pod pritiskom.

Trajanje druge faze se pri ocenjevanju preostale življenjske dobe običajno predvideva glede na izmerjeno gostoto korozijskega toka in še sprejemljivo zmanjšanje preseka armaturnih palic.

Računska življenjska doba konstrukcije, kjer je dominantni mehanizem razpadanja korozija armature, je torej:

$$t_r = t_1 + t_2 \quad (\text{En. 6})$$

Trajanje začetne faze

a) v primeru karbonatizacije

Izračuna se iz primerne izraza za globino karbonatizacije v odvisnosti od časa:

$$x = K_c \times t^n \quad (\text{En. 7})$$

kjer pomenijo:

- x – globina karbonatizacije v cm
- t – čas v letih
- n – 0,5 do 0,25
- K_c – koeficient karbonatizacije, ki je običajno funkcija vlage in temperature okolice

ali

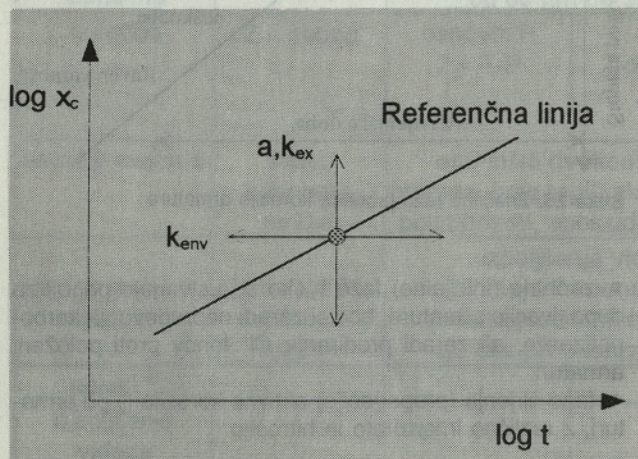
$$x_c = a \times k_{ex} \times (k_{env} \times t)^{1/2} \quad (\text{En. 8})$$

kjer pomenijo:

- x_c – globina karbonatizacije v cm

- a – koeficient kakovosti in sestave betona
 k_{ex} – faktor kakovosti izvedbe
 k_{env} – faktor agresivnosti okolja
 t – čas v letih

Pomen in vplivnost posameznih faktorjev sta razvidna iz slike 26.



Slika 26. Globina karbonatizacije v odvisnosti od časa in vpliv sestave betona (a), kakovosti izvedbe (k_{ex}) in agresivnosti okolja (k_{env})

Čas začetne faze t_1 se določi iz pogoja, da je karbonatizacija dosegla armaturne palice in je torej njena globina x enaka debelini zaščitnega sloja c . Bolj sofisticirani modeli pa pri računanju življenjske dobe zaradi napredovanja karbonatizacije že uporabljajo verjetnostni pristop.

b) v primeru penetracije kloridov z difuzijo

Izračuna se iz izraza za koncentracijo Cl^- ionov v globini x , v času t_0

$$C(x, t_0) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{Cl} \cdot t}} \right) \quad (\text{En. 9})$$

kjer pomenijo:

- $C(x, t)$ – koncentracija kloridnih ionov (ut.% na maso betona ali cementa) v globini x (cm), po času t (sek)
 C_0 – začetna koncentracija (ut.% na maso betona ali cementa), na površini betona (globina x_0) v času t_0
 D_{Cl} – koeficient difuzije kloridnih ionov (cm^2/s)
 erf – funkcija napake.

Začetna faza t_1 se konča, ko doseže koncentracija kloridnih ionov v globini armature določeno kritično vrednost (0,4 % do 1 % na maso cementa v armiranem betonu oz. 0,2 % do 0,5 % v prednapetem betonu).

Trajanje faze širjenja korozije

Trajanje druge faze t_2 je možno najboljše oceniti z izrazom /8/:

$$t_2 = \frac{0,1 \times \Phi_i}{\gamma \times (0,023 \times p \times i_{kor})} \quad (\text{En. 10})$$

kjer pomenijo:

- Φ_i – začetni premer armaturne palice v cm
 γ – varnostni koeficient
 p – koeficient povečanja gostote korozijskega toka glede na lokacijo objekta
 i_{kor} – gostota korozijskega toka v A/cm^2

Vrednosti i_{kor} in kriteriji za hitrost napredovanja korozije so podani preglednici 14b.

Projektiranje trajnosti nove konstrukcije

Ob uporabi gornjih enačb se naloga rešuje glede na zahteve podane v projektu konstrukcije in poznane vhodne podatke. Glede na okoliščine je pri tem treba rešiti eno od treh nalog:

a) Določitev sestave betona

- Zahteva: življenjska doba t let
- Vhodni podatki: izbrana debelina zaščitnega sloja c , začetna koncentracija (predvidena koncentracija agresivnega medija na površini betona) C_0 ali K_c
- Izračunana vrednost: potrebni parameter prepustnosti (D , A ali k) in pripadajoča v/c vrednost.

b) Določitev debeline zaščitnega sloja

- Zahteva: življenjska doba t let
- Vhodni podatki: parameter prepustnosti (D ; A ; ali k), začetna koncentracija C_0 ali K_c
- Izračuna vrednost: potrebna debelina zaščitnega sloja c

c) Določitev življenjske dobe

- Vhodni podatki: debelina zaščitnega sloja c , parameter prepustnosti (D ; A ; ali k), predvidena začetna koncentracija C_0 ali K_c
- Izračunana vrednost: življenjska doba t let.

Pri projektiranju trajnosti se življenjska doba t običajno računa z določeno rezervo, tako da se faza širjenja korozije t_2 ne upošteva in je enostavno $t = t_1$, ko preneha pasivna zaščita.

Podatki za parametre prepustnosti in začetne koncentracije je mogoče najti v literaturi. Bolj zanesljiv vir je lastna podatkovna baza meritev na betonih iz istih osnovnih materialov.

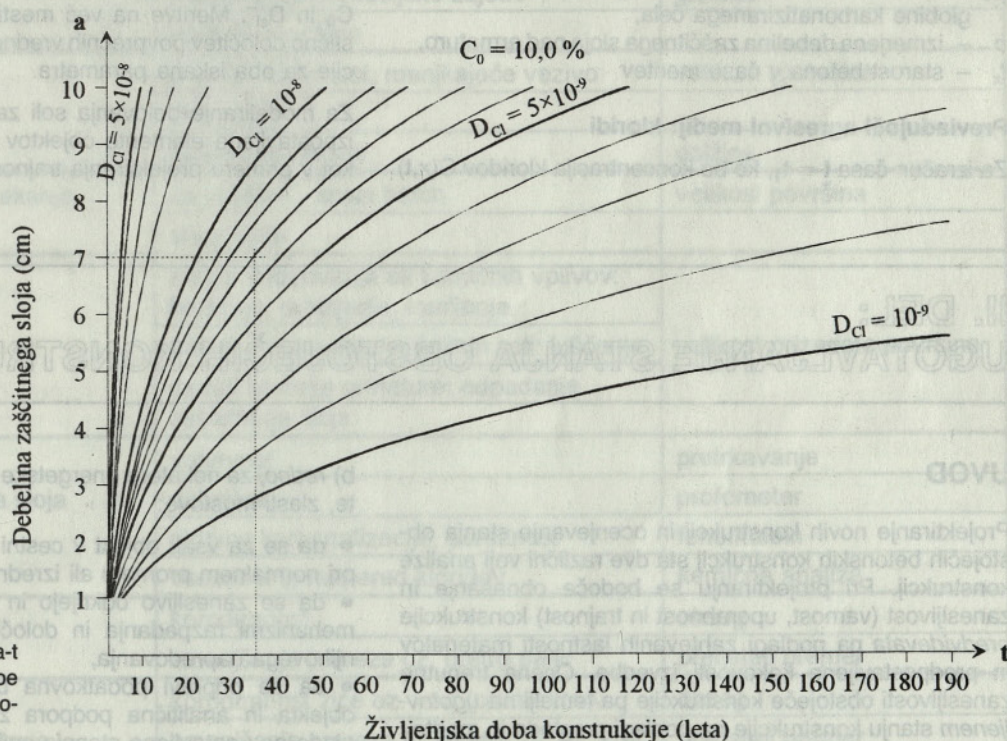
Problematičen je zlasti izbor ustrezne vrednosti za začetno koncentracijo. Za kolikor toliko stalne okoliščine, v kakršnih se nahajajo objekti v morski vodi ali v obmorski atmosferi, so podatki na razpolago ali pa jih je možno dovolj zanesljivo pridobiti z enostavnimi meritvami vsebnosti kloridov na elementih v podobnih razmerah. Delovanje kloridov na betonske elemente na cestah in mostovih pa je mnogo bolj zapleteno, ker se soljenje opravlja

občasno in ker se vlažnost betona ciklično spreminja, s tem pa tudi koncentracija kloridov na površini betona. Za te okoliščine je možno dobiti primerno zanesljive podatke le iz večjega števila meritev na gotovih objektih, ki jih je treba obdelati s primerno analitično metodo, npr. s pomočjo nevronske mreže. /9/

Za reševanje enačbe 9 obstajajo poleg računalniških programov tudi enostavni nomogrami /10/, iz katerih je možno za poznane vhodne podatke direktno odčitati iskano vrednost iz naloge, ki jo je treba rešiti (slika 27). Žal so uporabni le za betone, ki se nahajajo v bolj ali manj stacionarnih okoliščinah.

Običajno se predpostavlja, da lahko sega preostala življenjska doba deloma v fazo širjenja korozije t_2 . Z enačbo 10 se izračuna čas od začetka korozije, ko se premer glavnih armaturnih palic v prizadetem konstrukcijskem elementu zmanjša na še dopustno mejo, ki jo dovoljuje ocena varnosti konstrukcije (slika 28).

Preostalo življenjsko dobo lahko ocenjujemo oz. napovedujemo enotno za celotni objekt ali pa za posamezne dele objekta ali dele konstrukcije. Slednje prihaja v poštev pri razsežnih objektih, če je bila s preskusi ugotovljena različna stopnja ali kategorija poškodovanosti.



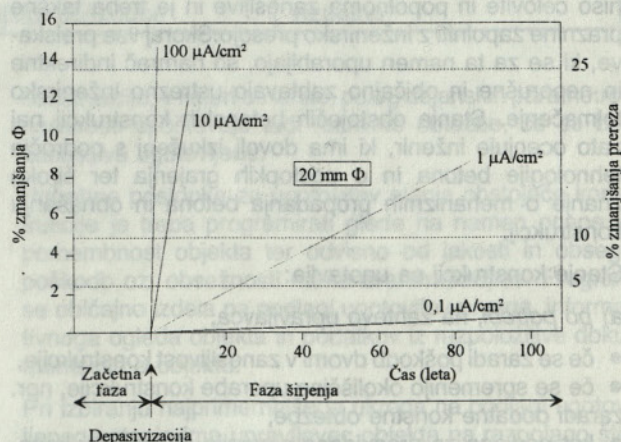
Slika 27. Nomogram C-D-a-t za določanje življenjske dobe betona v primeru difuzije kloridov

Napovedovanje preostale življenjske dobe

Preostala življenjska doba se ugotavlja glede na zatečeno stanje betona in dominantni agresivni medij (CO_2 ali kloridi), ki se določijo s kemično analizo vzorcev, vzetih iz konstrukcije. Za ta namen je treba s preskušanjem na objektu dobiti podatke o:

- karakteristični debelini zaščitnega sloja,
- pH-vrednosti oz. globini karbonatizacije, izraženi s karakteristično vrednostjo,
- koncentracijah Cl^- ionov po globini zaščitnega sloja armature
- prepustnosti betona, izraženi z enim od parametrov.

Ti podatki in poznana starost konstrukcije teoretično omogočajo določitev koeficienta karbonatizacije oz. koeficientov prepustnosti (D , A , k) betona v konstrukciji.



Slika 28. Ocena zmanjševanja prereza armature premera 20 mm

Prevladujoči agresivni medij: CO₂

Koeficient karbonatizacije K_c se določi po enačbi 7 iz primerne števila meritev globine karbonatizacije x oz. pH vrednosti na različnih mestih konstrukcije. Šteti je, da se čelo karbonatizirane plasti zaščitnega sloja v globini x nahaja pri $\text{pH} \approx 10$.

Preostalo trajanje začetne faze t_{1x} je nato

$$t_{1x} = \left(\frac{K_c}{c} \right)^{1/n} - t_x \quad (\text{En.11})$$

kjer pomenijo:

K_c – koeficient karbonatizacije, ugotovljen s preskusi globine karbonatiziranega čela,

c – izmerjena debelina zaščitnega sloja nad armaturo,

t_x – starost betona v času meritev

Prevladujoči agresivni medij: kloridi

Za izračun časa $t = t_1$, ko bo koncentracija kloridov $C(x,t)$

v globini zaščitnega sloja $x = c$ dosegla določeno kritično vrednost C_{kr} , je treba v enačbi 9 poznati začetno koncentracijo Cl^- ionov C_0 in koeficient difuzije D_{Cl^-} . Obe vrednosti je v načelu možno določiti s preskusom večjega števila vzorcev vzetih iz objekta.

V enostavnejših okoliščinah, ko je delovanje agresivnega medija bolj ali manj stacionarno (npr. v morskem okolju), se za začetno koncentracijo kloridov v nekem elementu vzame izmerjena koncentracija v zunanjih 5 mm zaščitnega sloja. Precej zanesljive podatke o začetni koncentraciji in koeficientu difuzije dobimo, če pri poznani starosti betona na več mestih izmerimo koncentracije $C(x,t)$ na različnih globinah x . Na ta način lahko za vsako preskušeno mesto rešimo po dve enačbi z dvema neznankama C_0 in D_{Cl^-} . Meritve na več mestih omogočajo tudi statistično določitev povprečnih vrednosti in koeficientov variacije za oba iskana parametra.

Za modeliranje delovanja soli za taljenje oz. slanice na izpostavljene elemente objektov na cestah pa velja isto kot v primeru projektiranja trajnosti teh elementov /9/.

II. DEL:

UGOTAVLJANJE STANJA OBSTOJEČIH KONSTRUKCIJ

UVOD

Projektiranje novih konstrukcij in ocenjevanje stanja obstoječih betonskih konstrukcij sta dve različni veji analize konstrukcij. Pri projektiranju se bodoče obnašanje in zanesljivost (varnost, uporabnost in trajnost) konstrukcije *predvidevata* na podlagi zahtevanih lastnosti materialov in predpostavljene kakovosti izvedbe. Ocena trenutne zanesljivosti obstoječe konstrukcije pa temelji na *ugotovljenem* stanju konstrukcije na podlagi pregleda in meritev konstrukcije ter preskusov vgrajenih materialov. Pri tem pa se vedno lahko zgodi, da tako pridobljene informacije niso celovite in popolnoma zanesljive in je treba takšne praznine zapolniti z inženirsko presojo. Skoraj vse preiskave, ki se za ta namen uporabljajo, so namreč indirektne in neporušne in običajno zahtevajo ustrezno inženirsko tolmačenje. Stanje obstoječih betonskih konstrukcij naj zato ocenjuje inženir, ki ima dovolj izkušenj s področja tehnologije betona in o postopkih grajenja ter široko znanje o mehanizmih propadanja betona in obnašanju konstrukcij.

Stanje konstrukcij se ugotavlja:

a) *po potrebi*, na zahtevo upravljavca,

- če se zaradi poškodb dvomi v zanesljivost konstrukcije,
- če se spremenijo okoliščine uporabe konstrukcije, npr. zaradi dodatne koristne obtežbe,
- kot podlaga za predvideno sanacijo ali ojačitev konstrukcije.

b) *redno*, za nekatere energetske in infrastrukturne objekte, zlasti mostove:

- da se za vsak objekt v cestni mreži zagotovi varnost pri normalnem prometu ali izrednih prevozi,
- da se zanesljivo odkrijejo in spremljajo prevladujoči mehanizmi razpadanja in določijo parametri za prikaz njihovega napredovanja,
- da se pripravi podatkovna baza o stanju vsakega objekta in analitična podpora za razvrščanje objektov glede na ugotovljeno stopnjo poškodovanosti in za sprejemanje odločitev o potrebnih ukrepih,
- da se določijo prioritete vzdrževalnih in obnovitvenih del ter zamenjav neustreznih objektov.

Podlage za ugotovitev stanja obstoječih konstrukcij so:

- podatki o zasnovi in gradnji konstrukcije, o okolju in o njeni uporabi,
- podatki pregleda konstrukcije,
- rezultati in-situ in laboratorijskih preiskav.

Ugotavljanje stanja obstoječe konstrukcije zato običajno obsega:

- preučitev dokumentacije o objektu: izvedbenega projekta, dokazil o kakovosti vgrajenih materialov iz katerih se razberejo bistvene karakteristike vgrajenih materialov (marka betona, posebne lastnosti betona, vrsta jekla), zapisnika tehničnega pregleda, poročil o morebitnih prejšnjih pregledih in izvedenih ukrepih,

Preglednica 8. Poškodbe betona in jekla, pomembne za oceno poškodovanosti betonske konstrukcije

Predmet pregleda - opazovanja	Vrsta ali oblika poškodbe	Osnovne preiskave
Razpoke	nastale pred strditvijo betona in zaradi napak betoniranja	dolžina, širina in odprtina razpoke
	zaradi preobtežbe, vsiljenih ali oviranih deformacij	
	zaradi kemijskih procesov	
	vzdolž armaturnih palic ali kablov, zaradi korozije jekla	
Mehanske poškodbe betona	odlom zaradi udarca	velikost (površina)
	erozijske ali kavitacijske zajede	globina
	abrazija površine	
Napake betoniranja	gnezda, votlavost, manjkajoče vezivo	velikost (površina)
	slojevitost	
	razkrita armatura	dolžina
Vlažna mesta - zamakanje	na površini - skozi beton	velikost površina
	skozi stike	
Razpadanje betona	zaradi zmrzovanja ali kemičnih vplivov: krušenje, drobljenje, lomljenje	velikost prizadete površine
	zaradi zmrzovanja in talilnih soli: luščenje	
	zaradi korozije armature: odpadanje zaščitnega sloja	
Kakovost zaščitnega sloja	votlavost	pretrkavanje
	debelina	profometer
	globina karbonatizacije, poroznost	fenolfalein
	vsebnost in razpored kloridov	kemična analiza
Jeklo za armiranje	korodiranost	obseg
	zmanjšanje prereza oz. pretrg palic	preostali premer
Jeklo za prednapenjanje	korodiranost žice oz. vrvi (pramenov)	obseg
	zmanjšanje prereza oz. pretrg žic oz. vrvi	preostali premer
	praznine v zaščitnih ceveh kablov	endoskop
Sidrišča kablov	mehanske in korozijske poškodbe	vizualno

- ogled konstrukcije, kar je podlaga za načrt nadaljnjega dela,
- pregled konstrukcije,
- izvedbo načrtovanih preskusov, s katerimi se ugotovijo dejanske lastnosti vgrajenih materialov in/ali vzroki, jakost in obseg posameznih vrst poškodb,
- kategorizacijo posameznih, za stanje konstrukcije odločujočih poškodb, in kategorizacijo poškodovanosti celotnega objekta oz. njegovih delov, ki izdvoji najbolj poškodovana in najbolj ogrožena območja na konstrukciji,
- oceno preostale življenjske dobe konstrukcije, glede na ugotovljeno stanje ali po opravljenih popravilih oz. rekonstrukciji,
- po potrebi: oceno trenutne varnosti in uporabnosti

konstrukcije, v kateri se lahko, poleg dejanskih parametrov nosilnosti upoštevajo tudi resnične obtežbe, če so bile zanesljivo ugotovljene.

Potrebne postopke za ugotovitev stanja obstoječe konstrukcije je treba programirati glede na namen ocene in pomembnost objekta ter odvisno od jakosti in obsega poškodb oz. obsežnosti nameravanih ukrepov. Program se običajno izdela na podlagi ugotovitev prvega, informativnega ogleda objekta in podatkov iz razpoložljive dokumentacije o objektu.

Pri izbiranju najprimernejšega ukrepa na podlagi ugotovljenega stanja ima upravljavec objekta na razpolago štiri glavne opcije:

- ne storiti ničesar, t.j. pustiti konstrukcijo v zatečenem stanju in odložiti ukrepanje,
- začasno ustaviti prevladujoči proces razpadanja, npr. korozijo armature,
- sanirati ali ojačiti konstrukcijo,
- zamenjati obstoječi objekt z novim.

Zanimiva in racionalna je zlasti prva možnost. Ponuja se v primeru poškodovanih konstrukcij, ki pa imajo iz katerega koli razloga še zadostno varnost, zlasti če se jim izteka življenjska doba. Takšna odločitev namreč omogoča preusmeritev načrtovanih sredstev na druge, bolj kritične probleme.

PREGLED KONSTRUKCIJE

V okviru pregleda konstrukcije, ki je pretežno vizualen, lahko pa vsebuje enostavne meritve in osnovne preiskave, je treba:

- ugotoviti neskladja ali spremembe glede na projekt izvedenih del,
- preveriti obnašanje in funkcionalnost posameznih konstruktivnih elementov ali delov objekta; na nepravilno obnašanje konstrukcije ali njenih elementov se sklepa iz nenormalnih deformacij (povesov, zasukov) ali odstopanja od vertikale,
- odkriti poškodbe in napake na betonu in armaturi, ki pomenijo odstopanje od zahtev projekta konstrukcije in bi zato lahko vplivale na varnost, uporabnost in/ali trajnost konstrukcije, pri mostovih pa tudi na varnost prometa,
- po potrebi opraviti osnovne preiskave oz. meritve, ki omogočijo popolnejšo in kvantificirano oceno stanja poškodovane konstrukcije; poleg sklerometriranja za oceno tlačne trdnosti so to predvsem meritve širine razpok in preiskave za ugotovitev debeline in kakovosti zaščitnega sloja armature,
- določiti potrebne dodatne preskuse na objektu in v laboratoriju za ugotovitev dejanskih lastnosti vgrajenih materialov ter vzrokov in obsega poškodb,
- oceniti morebitno neposredno nevarnost ugotovljenih poškodb za varnost konstrukcije.

V preglednici 8 so navedene bistvene poškodbe in pomanjkljivosti betona in jekla, ki jim je med pregledom treba nameniti pozornost in podatki, ki jih je treba pridobiti z enostavnimi meritvami in osnovnimi preskusi.

Poročilo o pregledu mora vsebovati

- opis ugotovljenih napak, poškodb in pomanjkljivosti, rezultate opravljenih meritev,
- po potrebi: zahtevo po dodatnih preiskavah, za ugotovitev lastnosti vgrajenih materialov ter vzrokov, jakosti in obsega poškodb,
- sklep o stanju konstrukcije in potrebnih ukrepih za odpravo oz. popravilo ugotovljenih poškodb in pomanjkljivosti.

Za objekte, ki se redno pregledujejo, obstajajo stalni

obrazci teh poročil, v katerih se uporabljajo poenoteni opisi poškodb, kar omogoča računalniško vnašanje in obdelavo pridobljenih podatkov /11/.

PREISKAVE ZA DOLOČITEV STANJA BETONA IN ARMATURE

V preglednici 9 so navedene fizikalne in mehanske, pretežno neporušne preiskave, namenjene pridobitvi podatkov o:

- lastnostih in strukturi betona,
- položaju in dimenzijah armature,
- lastnostih in stanju armature,
- jakosti in obsegu nekaterih poškodb.

Izbor teh preiskav je treba prilagoditi glavnim ciljem preskušanja, ki so:

- določitev parametrov za izračun dejanske nosilnosti kritičnih prereзов, potrebnih za oceno varnosti konstrukcije:
 - trdnost,
 - modul elastičnosti,
 - položaj in prerez armature, debelina zaščitnega sloja,
 - globina razpok,
 - homogenost
- pridobitev podatkov o jakosti in obsegu poškodb, potrebnih za projekt sanacije ali za oceno preostale življenjske dobe; v primeru kloridne korozije armature so to zlasti:
 - koncentracije kloridov po prerezu, da se določi globina potrebnega odstranjevanja kontaminiranega betona,
 - globina karbonatizacije oz. pH vrednost, ker vpliva na dovoljeno dopustno koncentracijo kloridov v neodstranjenem betonu
 - verjetnost korozije s kartiranjem potencialov, da se pod še nepoškodovanim zaščitnim slojem odkrijejo začetki korozije na armaturi,
 - debelina zaščitnega sloja, da se po potrebi predvidi povečanje debeline,
 - vrsta in globina korozije, da se po potrebi nadomesti morebiti manjkajoči prerez,
 - vlažnost,
 - penetrabilnost.

Preiskave je treba opraviti čim bolj sistematično in selektivno tudi na na videz nepoškodovanih delih konstrukcije. Le tako je v začetni fazi procesa korozije možno odkriti ogroženost armature zaradi napredujoče karbonatizacije ali prodiranja kloridov, in predvideti čas depasivizacije in začetek aktivne korozije armature. Podobno velja tudi v primeru drugih procesov razpadanja, ki grozijo varnosti in trajnosti konstrukcije.

KRITERIJI KAKOVOSTI BETONA IN ARMATURE V KONSTRUKCIJI

Mednarodno usklajene kriterije za oceno kakovosti betona

Preglednica 9. Preiskave za določitev stanja in poškodovanosti vgrajenega betona in armature

Parameter/meritev *	Metoda/naprava *	Standard
a. Lastnosti betona		
Penetrabilnost: H_2O , O_2 , Cl^- , CO_2		
zaradi vpijanja	ISAT - L, T	JUS U.M8.300 BS 1881
zaradi prepustnosti	FLOPLAB - L APIS - L, T vodoprepustnost - L	DIN 51058 GFZ DIN 1048
zaradi difuzije	difuzijska celica - L	
Debelina zaščitnega sloja	profometer - L, T	
Natezna trdnost	Pull-off - L, T Break-off - L, T	BS 1881 BS 1881
Tlačna trdnost	iz konstrukcije izvrtani valji sklerometriranje - L, T ultrazvok - L, T Pull-out - L, T Windsor probe - L, T	JUS U.M1.020 JUS U.M1.041 JUS U.M1.042 BS 1881 BS 1881
b. Struktura in stanje betona		
Poroznost	mikroskopija vakumiranje	ASTM C 457
Razpoke	ultrazvok - L, T akustična emisija - L merila, senzorji - L, T	BS 1881 BS 1881
Homogenost	ultrazvok - L, T radiografija - L, T radiometrija - L, T termografija - L, T	JUS U.M1.042 BS 1881 BS 1881 BS 1881
Vlažnost	vlagomer - L, T nevtronska tehnika - L, T	BS 1881 BS 1881
Kloridi v betonu	Hachova metoda - L, T titracijska metoda - L	JUS B.C1.011
Globina karbonatizacije	Hachova metoda - L, T fenolftalein - L, T	
c. Položaj in dimenzije armature		
Položaj	profometer - T radar - T	
Dimenzija	profometer - T	
d. Lastnosti in stanje armature		
Diagram $\sigma - \epsilon$	L	
Vizuelna kontrola	endoskopija - T	DIN 1048
Verjetnost korozije	kartiranje elektropotencialov - T kartiranje električnega upora	ASTM C 876/80 BS 1881
Hitrost korozije	elektrokemične meritve - L	ASTM
Vrsta in globina korozije	metalografija - L rentgenska analiza - L	

* L - laboratorijska meritev/preskus

T - terenska meritev/preskus

Preglednica 10a. Penetrabilnost – vpijanje vode

Začetno površinsko vpijanje v ml/m ² /s			Količina vpijanja (%)	Koeficient vpijanja v ml/s ^{0,5}	Vpojnost betona	Kakovost betona
po 10 min.	po 30 min.	po 1 uri				
< 0,25	< 0,17	< 0,10	< 3	< 5×10 ⁻⁶	majhna	dobra
0,25 do 0,50	0,17 do 0,35	0,10 do 0,20	3 do 5	5×10 ⁻⁶ do 1×10 ⁻⁵	srednja	srednja
> 0,50	> 0,35	> 0,20	5	> 10 ⁻⁵	visoka	slaba

Preglednica 10b. Penetrabilnost – vodoprepustnost

Vodoprepustnost v m/s	Vodoprepustnost betona	Kakovost betona
< 10 ⁻¹²	majhna	dobra
10 ⁻¹² do 10 ⁻¹⁰	srednja	srednja
> 10 ⁻¹⁰	visoka	slaba

Preglednica 10c. Penetrabilnost – plinoprepustnost

Plinoprepustnost v m ²	Plinoprepustnost betona	Kakovost betona
< 10 ⁻¹⁸	majhna	dobra
10 ⁻¹⁸ do 10 ⁻¹⁶	srednja	srednja
> 10 ⁻¹⁶	velika	slaba

Preglednica 10d. Penetrabilnost – difuzija klorovih ionov

Koeficient difuzije klorovih ionov v m ² /s	Difuzija klorovih ionov v beton	Kakovost betona
< 10 ⁻¹²	majhna	dobra
1 × 10 ⁻¹² do 5 × 10 ⁻¹²	srednja	srednja
> 5 × 10 ⁻¹²	močna	slaba

Preglednica 11. Površinska trdota betona – sklerometriiranje

Srednji odčitek na sklerometru	Kakovost betona
> 40	dobra
30 do 40	srednja
20 do 30	slaba
< 20	votlavost, razpokanost

Preglednica 12. Homogenost betona

Radiografija: reflektirajoči odčitek v mm	Ultrazvok: hitrost v km/s	Kakovost betona
> 8,5	> 4	dobra
7,5 do 8,5	3 do 4	srednja
< 7,5	< 3	slaba

Vsebnost klorovih ionov (v % na maso cementa)	Tveganje za korozijo armature
< 0,4	majhno
0,4 do 1,0	srednje
> 1,0	veliko

Preglednica 13. Vsebnost klorovih ionov v betonu

Korozijska napetost Ekor v mV	Verjetnost korozije
> - 200	< 5 %
- 200 do - 350	≅ 50 %
< - 350	> 95 %

Preglednica 14a. Verjetnost in hitrost napredovanja korozije armature – kartiranje potencialov – polceličnih z baker-bakersulfatno elektrodo (Cu/CuSO₄)

Električna upornost betona v Ohm × cm × s	Hitrost napredovanja korozije
> 20 000	neznatna
10 000 do 20 000	majhna
5 000 do 10 000	velika
< 5 000	želo velika

Preglednica 14b. Verjetnost in hitrost napredovanja korozije armature – električna upornost betona

Gostota korozijskega toka v A/m ²	Hitrost napredovanja korozije
10 ⁻⁴ do 10 ⁻³	0,1 do 1 mm/leto
10 ⁻² do 10 ⁻¹	≅ 0,1 mm/leto
> 1	≅ 1 mm/leto

Preglednica 14c. Verjetnost in hitrost napredovanja korozije armature – gostota električnega toka

in stopnje korodiranosti armature glede na dobljene rezultate preiskav nekaterih značilnih lastnosti in strukture betona ter armature je pripravil CEB (Evropski komite za beton) /12/. Prikazani so v Preglednicah 10, 11, 12, 13 in 14.

KATEGORIZACIJA POŠKODB IN POŠKODOVANOSTI KONSTRUKCIJE

Splošno

Ugotovljene poškodbe ali objekt je smiselno in koristno razvrstiti v ustrezen poškodbeni razred oz. mu določiti stopnjo poškodovanosti. Na ta način se ugotovitve pregleda ovrednotijo in dopolni opisna ocena poškodbe oz. stanja konstrukcije. S takšnim podatkom upravljalec objekta lažje načrtuje potrebne ukrepe. Na podlagi kategorizacije je možno določiti dele objekta, ki jih je treba

najprej sanirati in tudi izdelati grobo oceno stroškov ukrepanja.

Poškodbeni razred neke poškodbe je opredeljen z ustreznimi parametri njene jakosti in razširjenosti, poškodbeni razred objekta ali njegovih delov pa je običajno opredeljen z možnimi posledicami ugotovljenega stanja za varnost, uporabnost in trajnost konstrukcije.

V obeh primerih so kriteriji za določitev kategorije lahko:

- subjektivni, kadar pregledovalec določi kategorijo po svoji osebni presoji,
- opisni in kvalitativni, na podlagi podrobnih opisov vsake stopnje poškodbe in posledic za zanesljivost konstrukcije, po možnosti pa vsebujejo tudi merljive parametre,
- kvantificirani, na podlagi primerjave preiskanih lastnosti vgrajenih materialov z uveljavljenimi kriteriji kakovosti, ki za posamezne kategorije poškodovanosti določajo mejne vrednosti značilnih lastnosti betona in armature.

Izbira metode in poti je odvisna od pomembnosti objekta,

v največji meri pa od usposobljenosti pregledovalca.

Kategorizacija večjih in zahtevnejših objektov se običajno izvaja v dveh fazah. V prvi fazi določi kategorijo oz. razred poškodovanosti izkušen pregledovalec po videzu poškodb in s pomočjo opisnih kriterijev za posamezni razred. V drugi fazi se kategorizacija poškodovanih območij dopolni in kvantificira z rezultati preiskav.

Opisni kriteriji za kategorizacijo poškodovanih objektov

Obstaja veliko načinov opisnega klasificiranja poškodovanih objektov. Izmed številnih predlogov je za ilustracijo, kot zelo primerna izbrana metoda iz /13/ (preglednici 15 in 16).

Kategorizacija na podlagi preiskanega stanja betona in jekla

Za ta namen se na več poškodovanih mestih opravijo preiskave izbranih lastnosti betona in armature, ki so indikativne za ugotovljeni prevladujoči mehanizem propadanja konstrukcije. V poštev prihajajo preiskave, ki so relativno enostavne in jih je možno opraviti v primerno velikem številu, tako da se dobljeni rezultati lahko tudi statistična obdelajo. Število mest oz. območij na konstrukciji, ki se za ta namen raziščejo in izbira najprimernejših preiskav so odvisni od velikosti in razčlenjenosti objekta in od vrste in različnosti poškodb, ki so bile ugotovljene pri pregledu objekta.

Dobljeni rezultati preiskav določene lastnosti se nato primerjajo z ustreznim kriterijem kakovosti vgrajenega betona oz. armature. Kategorija poškodovanega mesta na konstrukciji je načelno tista, ki jo pokaže največ izmerjenih parametrov. Nanaša se na celotno pripadajoče območje z enako sliko poškodovanosti.

Preglednica 15. Kriteriji razvrščanja objektov v poškodbene razrede

Razred	Opis stanja in posledic ter primeri poškodb
I	Nobenih poškodb , le pomanjkljivosti gradnje. Predvideti ni treba nobenih sanacijskih ukrepov. <i>Primeri:</i> geometrijske nepravilnosti, estetske pomanjkljivosti, razlike v barvi betona
II	Lažje poškodbe , ki bi šele čez dolgo časa vplivale na zmanjšanje uporabnosti in trajnosti, če se ne bi v primernem času odpravile. Poškodbe je mogoče odpraviti z majhnimi stroški v okviru vzdrževanja. <i>Primeri:</i> lokalne razpoke, manjše pomanjkljivosti betoniranja, na mestih pretanek zaščitni sloj.
III	Srednje poškodbe , ki vplivajo na zmanjšanje uporabnosti in trajnosti, vendar ne zahtevajo omejitve uporabe. Potrebna je sanacija poškodb v primerno kratkem roku. <i>Primeri:</i> razpoke, pomanjkljivosti betoniranja, tanek zaščitni sloj na vlažnih mestih, poškodbe izolacije na mostovih
IV	Težke poškodbe , ki bistveno zmanjšujejo uporabnost in trajnost, vendar še ne zahtevajo omejitve uporabe. Potrebna je takojšnja sanacija, s katero se lahko še ohranita projektirana uporabnost in trajnost. <i>Primeri:</i> korozijske poškodbe na glavnih nosilnih elementih, odprte rege, pomanjkljivosti injektiranja prednapetih kablov
V	Zelo težke poškodbe , ki zahtevajo omejitev uporabe, na mostovih delno zmanjšanje dopustne teže vozil, ali začasno podpiranje ali druge varovalne ukrepe. Potrebna je takojšnja sanacija; brez posebnih ojačitvenih posegov je možno takšno konstrukcijo usposobiti za delno zmanjšano uporabo in ji zagotoviti omejeno uporabnost in trajnost. <i>Primeri:</i> močna korozija armature in kablov v glavnih nosilnih elementih, močne razpoke zaradi preobteženosti, voda v ceveh za kable, zlom ležišča, manjše zmanjšanje varnosti konstrukcije iz kakršnega koli vzroka.
VI	Izredno težke poškodbe , ki zahtevajo takojšnje podpiranje konstrukcije in bistveno omejitev uporabe, na mostovih popolno zaporo prometa. Potrebna je takojšnja, obsežna sanacija, s katero pa konstrukcije ni več mogoče usposobiti za prvotno uporabo niti ji zagotoviti primerne trajnosti oz. preostale življenjske dobe oziroma bi bili stroški za to ekonomsko neupravičeni. <i>Primeri:</i> podobno kot za V in vsako znatno zmanjšanje varnosti konstrukcije.

Preglednica 16. Opisni kriteriji za jakost poškodb betona in jekla za armiranje

Stopnja	Jakost	Stadij	Opis stanja
I.	majhna	začetni	Poškodba je dimenzijsko majhna in lokalna. Nima tendence večanja. Nosilnost in trajnost elementa tudi dolgoročno nista ogroženi.
II	srednja	progresivni	Poškodba je dimenzijsko srednje velika, v glavnem lokalna ali pa se le v manjšem obsegu pojavlja na več mestih konstrukcijskega elementa. Ima tendenco večanja. Nosilnost in trajnost elementa se dolgoročno lahko poslabšata.
III	močna	aktivni	Poškodba je dimenzijsko velika in se pojavlja na več mestih konstrukcijskega elementa. Ima močnejšo tendenco večanja. Nosilnost in trajnost elementa sta ogroženi, vendar ne vplivata na uporabnost konstrukcije kot celote.
IV	zelo močna	kritični	Poškodba je dimenzijsko zelo velika in se pojavlja na pretežnem delu konstrukcijskega elementa. Ima zelo močno tendenco večanja. Nosilnost in trajnost elementa sta problematični in vplivata na uporabnost konstrukcije kot celote.

Preglednica 17. Kategorije poškodovanosti zaradi korozije armature

Kategorija Faza korozije	Opis stanja	Plinoprepust- nost, m ²	Elektropoten- ciali, mV	pH	Cl ⁻ ut.% cem	Pull-off MPa
I ni	razpoke < 0,1 mm	< 10 ⁻¹⁸	> -200	> 11	< 0,4	3,0
II začetna	razpoke < 1 mm, opazne sledi stremen	10 ⁻¹⁸ do 5×10 ⁻¹⁷	-200 do -350	11 do 10	0,4 do 1,0	3,0 do 2,0
III razširjenja	razpoke 1 - 2 mm, luščenje do 10 mm,	10 ⁻¹⁷ do 10 ⁻¹⁶	-350 do -500	10 do 9	1,0 do 2,0	2,0 do 1,0
IV aktivna	luščenje do 30 mm, odpadanje zaščitnega sloja lokalno in vzdolž robov, korodirana nosilna armatura	> 10 ⁻¹⁶	< -500	< 9	> 2,0	< 1,0
V kritična	odpadanje zaščitnega sloja na velikih površinah, prekorodirana armatura					

Postopek torej omogoča kvantificirano oceno stanja konstrukcije, ne dopušča pa samodejnega sklepanja o kategoriji poškodovanosti. Parametri, ki se preiskujejo in pripadajoči kriteriji namreč niso do te mere usklajeni, da bi vsak dobljeni rezultat preiskave pokazal isti kakovostni razred. Zlasti če je število preiskanih mest majhno, je pri odločanju še vedno nujna presoja strokovnjaka, ki mora v primeru neusklajenosti rezultatov na nekem območju dati realistično oceno stanja konstrukcije na nekem območju in določiti končno kategorijo poškodovanosti na tem mestu. Pri tem je koristno kombinirati tudi vizualne vtise o poškodovanosti obravnavanega območja in pri ocenjevanju upoštevati vse spremljajoče pojave, kot npr. razpokanost, zamakanje i.s.l.

V preglednici 17 so določene kategorije poškodovanosti zaradi korozije armature. Za vsako so navedeni vizualni kriteriji in mejne vrednosti za pet najustreznejših preiskav.

Zaradi omenjenih problemov smo na podlagi tega postopka razvili novo metodo določanja kategorije poškodovanosti, ki v osnovi prestavlja nevronska mreža. Temelji na bazi podatkov, pridobljenih s konkretnimi terenskimi in laboratorijskimi meritvami na obstoječih mostovih v Sloveniji. Metoda je bolj podrobno razložena v /9/.

UGOTAVLJANJE STANJA IN USTREZNOSTI OBSTOJEČIH MOSTOV

Splošno

Ustreznost mostov se ne ugotavlja le, ko se zaradi poškodb močno poslabša njihovo stanje in je treba na podlagi analiz in detajlnih raziskav v zvezi z ugotovljenim stanjem sprejeti odločitve o zanesljivosti konstrukcije in o potrebnih ukrepih, ampak tudi kot sestavni del sistema upravljanja mostov (BMS – *Bridge management system*). Eden od ciljev BMS je, da nudi upravitelju kvantificirane podatke o stanju vsakega mostu na cestno upravnem območju in da omogoči ovrednotenje problemov na mostu.

Glavne komponente sodobnega sistema upravljanja mostov so:

- Zbiranje podatkov:
 - o konstrukciji in stanju mostu,
 - o gostoti in strukturi prometa.
- Obdelava in vnašanje podatkov v podatkovno bazo:
 - poročila o pregledih mostov,
 - rezultati meritev teže težkih tovornih vozil.
- Izhodni podatki o vsakem mostu:
 - kazalci stanja,
 - rating ustreznosti,
 - kategorija poškodovanosti.

Podatkovna baza vsebuje splošne podatke o vsakem objektu, podatke o konstrukciji, izvršenih pregledih in vzdrževalnih ali sanacijskih ukrepih, ter kazalce stanja mostu.

Kazalci stanja predstavljajo informacijsko podporo za sprejemanje objektiviziranih odločitev o najustreznejših ukrepih na poškodovanih mostovih in omogočajo kvantificirano oceno uporabnosti nekega mostu. Kazalci stanja so: stopnja (rating) poškodovanosti objekta, dejanska varnost konstrukcije, preostala življenjska doba objekta in merilo funkcionalnosti mostu.

Rating ustreznosti je sintetična vrednost vseh izračunanih kazalcev stanja, ki celostno opredeljuje stanje in primerenost mostu in je zato namenjen razvrščanju mostov glede na nujnost ukrepanja.

Zbiranje podatkov

Zbiranju podatkov so namenjeni:

- redno pregledovanje vseh mostov na državnih in avto cestah,
- detajlno pregledovanje, preiskovanje in analiziranje poškodovanih konstrukcij,
- ugotavljanje dejanske teže težkih tovornih vozil in gostote prometa na mostovih s sistemom tehtanja med

vožnjo (WIM); potrebno je za določitev realne koristne obtežbe na mostu in oceno dejanske varnosti nosilne konstrukcije.

Redni pregledi mostov

V Sloveniji se pregledi mostov izvajajo na vseh mostovih v določenih časovnih intervalih, po pred nekaj leti vpeljanem sistemu /11/:

Vsaki 2 leti se opravi *redni pregled*, ki zajema vizualni pregled in, po potrebi, nekaj enostavnih in hitro izvedljivih preskusov (npr. ugotavljanje votlavosti oz. delaminacije zaščitnega sloja s pretrkavanjem, sklerometriranje i.sl.).

Vsaki 6 let je treba pri t.i. *glavnem pregledu* pregledati tudi mesta, ki so sicer pokrita ali pa dostopna le s posebnimi napravami in opraviti osnovne in-situ preskuse vgrajenih materialov (npr. meja karbonatizacije, vsebnosti kloridov po globini betona, trdnost betona). Z dobro programiranimi in v primernih časovnih razmakih izvajanimi osnovnimi preskusi na objektu je možno izdelati poenostavljene, vendar koristne ocene varnosti in življenjske dobe konstrukcije, ki omogočajo točnejše razvrščanje mostov glede na njihovo ustreznost.

Ugotovitve vsakega pregleda se sistematično zapisujejo in sproti vrednotijo po izdelani metodologiji /14/. Za ta namen je bil pripravljen tudi računalniški program, ki uporablja standardizirane in zgoščene opise poškodb na posameznih delih oz. elementih mostu (okolica objekta, podporna konstrukcija, prekladna konstrukcija, krov in oprema mostu) in na vseh možnih konstrukcijskih materialih (beton, jeklo, les, opeka, kamen, izolacija, asfalt) in delih mostne opreme (ležišča, dilatacije, ograja, odvodnjevanje). Pregledovalec določi tudi *številčno vrednost* vsake ugotovljene *poškodbe*, s katero se ovrednoti: vpliv poškodbe na varnost oz. trajnost konstrukcije, njena jakost in razširjenost na obravnavanem konstrukcijskem elementu in tudi nujnost ukrepanja, če zaradi ugotovljene poškodbe obstaja neposredna nevarnost za objekt ali okolico.

Detajlni pregledi

Detajlni pregled je potreben, če so bile pri rednem ali glavnem pregledu ugotovljene poškodbe, ki bi lahko ogrozile varnost in trajnost objekta. Na podlagi kartiranja ugotovljenih poškodb in sistematično opravljenih preskusov vseh tistih lastnosti vgrajenih materialov, ki so relevantne za ugotovitev vzrokov poškodb in oceno stanja konstrukcije, je treba s takšnim pregledom dobiti podatke za:

- kvantificirano *kategorizacijo* posameznih, različno poškodovanih območij na objektu, ki je namenjena zanesljivejši oceni obsega in stroškov sanacije za letni finančni načrt,
- določitev *realne nosilnosti* kritičnih prereзов nosilne konstrukcije, ki je potrebna za oceno njene dejanske varnosti,

• *modeliranje prevladujočega procesa propadanja* (korozijske), za natančnejšo oceno preostale življenjske dobe kritičnih elementov mostu ali posameznih kategoriziranih območij mostu s pomočjo primerne analitične metode.

Meritve prometa in modeliranje verjetne maksimalne obtežbe mostu

Sistemi za tehtanje vozil med vožnjo (ang. *WIM, weigh-in-motion*) omogočajo zbiranje podatkov o težah praktično vseh vozil, ki peljejo čez merjeno mesto. Dobljeni podatki o osnih pritiskih, osnih razdaljah, hitrostih in skupni teži vozil, ki so peljala čez tehtalni sistem, se statistično obdelajo in rabijo za pomoč pri:

- načrtovanju in kontroli prometa,
- dimenzioniranju in vzdrževanju voziščnih konstrukcij,
- določanju verjetne maksimalne obtežbe mostu.

Najbolj popolne podatke za analizo varnosti mostov nudi mostna različica WIM sistemov (*BWIM – Bridge weigh-in-motion*), pri katerem prevzame funkcijo tehtnice instrumentirana prekladna konstrukcija objekta. S to metodo pridobimo tudi podatke o odzivu konstrukcije, ki so pomembni za analizo varnosti mostu, npr. koeficienta sunka in prečnega raznosa obtežbe.

Statistično obdelani podatki o težah vozil, ki so v določenem času prečkala most, in podatki o spremljajočem odzivu konstrukcije se uporabijo v računskem modelu verjetne maksimalne obremenitve kritičnega prereza konstrukcije. Pričakovano maksimalno obtežbo mostu določimo s simulacijo ali z računsko metodo.

Značilna vrednost statistične obdelave je karakteristična teža določene kategorije vozil W_{95} , od katere je bilo težjih 5 % stehtanih vozil. Končni praktični podatek simulacije je faktor istočasne prisotnosti vozil H , ki pomnožen z W_{95} pomeni verjetno maksimalno obtežbo mostne razpetine s temi vozili.

Kazalci stanja konstrukcije

Stopnja (rating) poškodovanosti

Stopnja ali rating poškodovanosti je vsota vseh številčnih vrednosti, ki jih je na objektu za vsako ugotovljeno poškodbo določil pregledovalec v zapisniku o pregledu. Stopnja poškodovanosti izraža splošno poškodovanost celotnega objekta ali njegovega dela. Ta vrednost se uporablja za:

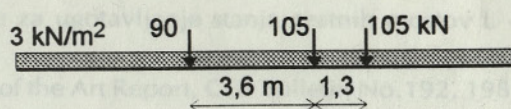
- *kategorizacijo poškodovanosti* glede na postavljene mejne vrednosti,
- *prvo razvrstitev* vseh mostov v cestno upravnem območju, ki je za manj poškodovane objekte (z nizko stopnjo poškodovanosti) tudi končna,

• *določitev tendence nadaljnega propadanja* konstrukcije s pomočjo regresijske krivulje po več zaporednih rednih in glavnih pregledih, kar omogoča tudi grobo predvidevanje preostale življenjske dobe mostu.

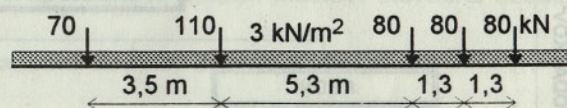
Varnost konstrukcije

Za izračun dejanske varnosti nekega mostu je treba razpolagati s podatki o resnični nosilnosti kritičnih prerezov konstrukcije in poznati verjetno maksimalno obremenitev teh prerezov. Na podlagi opravljenih WIM meritev na več objektih v R Sloveniji z različno strukturo prometa in izvedenih maksimalnih verjetnih obtežb na teh mostovih, je bila izdelana tudi posebna obtežna shema za primerjalno ocenjevanje varnosti mostov. Konfiguracija osi in osni pritiski vozila v tej shemi predstavljajo težka komercialna tovorna vozila, ki dejansko vozijo po naših cestah, 3-osni tovornjak teže 300 kN in 5-osni vlačilec teže 420 kN, kolikor znašajo njihove povprečne karakteristične teže (slika 29).

SLS 1



SLS 2



Slika 29. Posebni obtežni shemi za ocenjevanje varnosti obstoječih mostov

Dejansko varnost določamo z varnostnim indeksom β , ki posredno izraža verjetnost porušitve, primerjalno varnost pa določamo z *rating faktorjem* RF, ki je izpeljan iz enačbe za mejno stanje nosilnosti, in pomeni razmerje s katerim se, glede na razpoložljivo nosilnost, sme povečati ali mora zmanjšati prometna obremenitev. Rating faktor torej omogoča računsko podprto in zato bolj preudarno omejevanje dovoljene dopustne obtežbe mostov.

Bolj podrobno je sistem ugotavljanja varnosti predstavljen v /15/.

Preostala življenjska doba konstrukcije

Enostavne metode ugotavljanja preostale življenjske dobe obstoječih konstrukcij slonijo na spremljanju kazalcev stanja mostu, predvsem stopnje poškodovanosti. Kritična

raven stanja konstrukcije, ko naj bi bila tudi dosežena življenjska doba, se lahko določi s pomočjo regresijske krivulje, ki povezuje zaporedno ugotovljene vrednosti ratinga poškodovanosti.

Za bolj zanesljivo oceno preostale življenjske dobe, zlasti v primeru korozije armature, je treba uporabiti ustrezeni analitični model.

Na mostovih nastopi korozija armature in kablov za prednapenjanje zaradi karbonatizacije betona, najpogostejše pa zaradi penetracije kloridov iz talilnih soli. Zaradi klimatskih vplivov in režima soljenja se vsebnost in površinska začetna koncentracija kloridov med uporabo objekta spreminjata, pogosto pa gre za lokalizirano agresijo na mestih zamakanja. Zato je priporočljivo z večkratnim zaporednim merjenjem med glavnimi, pa tudi rednimi pregledi zbrati čim več podatkov o penetrabilnosti betona, koncentracijah kloridov v betonu in stopnji korodiranosti armature. Z metodami umetne inteligence, npr. z nevronskimi mrežami [12], je potem možno dobiti zanesljivejše praktične vrednosti parametrov difuzije kloridov (koeficient difuzije, začetna koncentracija) za izračun preostale življenjske dobe.

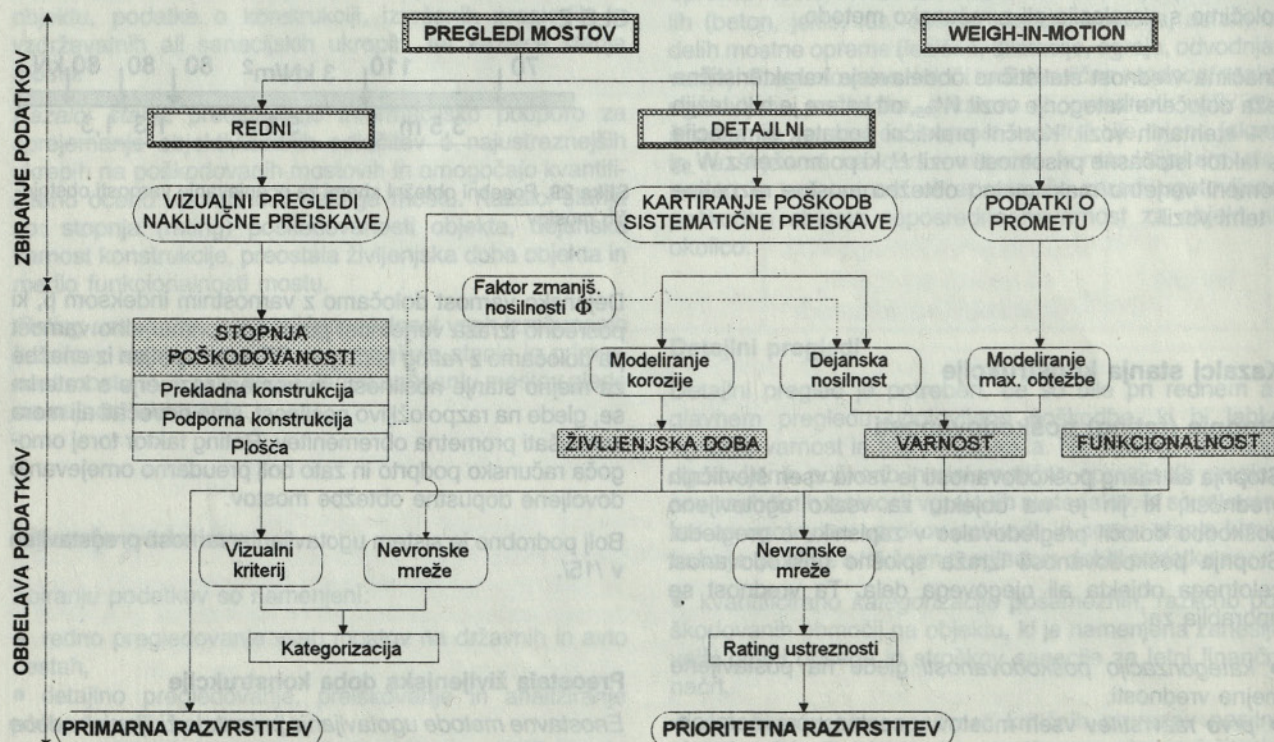
Rating ustreznosti

Rating ustreznosti združuje v eni številčni vrednosti štiri kazalce stanja mostu:

- varnost, izraženo z rating faktorjem RF ali z varnostnim indeksom β ,
- preostalo življenjsko dobo izraženo v letih,
- poškodovanost izraženo s stopnjo (ratingom) poškodovanosti, in
- funkcionalnost in položaj mostu v cestni mreži, izražena s kategorijami od 1 do 5.

Določi se s pomočjo tabel ali diagramov, ki so zasnovani z uporabo nevronskih mrež.

Rating ustreznosti predstavlja objektivno merilo za razvrščanje mostov glede na njihovo celotno stanje in uporabnost (slika 30).



Slika 30. Pot do ratinga ustreznosti

LITERATURA

1. Ukrainczyk, V., Bjegović, D., Žnidarič, J.: "Projektiranje trajnosti in napovedovanje preostale življenjske dobe armiranobetonskih mostov", 2. del raziskovalne naloge "Določanje varnosti in preostale življenjske dobe obstoječih mostov", ZAG Ljubljana, 1995
2. Durable Concrete Structures, CEB Design Guide, Bulletin d'Information No. 182, 1989
3. Mehta, P.K.: Concrete. Structure, properties and materials, Prentice-Hall, Inc.
4. CEB – FIP Model Code (MC 90), CEB Bulletin d'Information, No. 195-196, 1990
5. ENV 1992-Eurocode 2: Design of concrete structures
6. prEN 206 Concrete. Performance, production and conformity, 1996
7. ZTV-SIB 90: Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen, Bundesminister für Verkehr, Verkehrsblatt Verlag, Dortmund, 1990
8. Andrade, C., Alonso, C., Gonzales, J.A.: Approach to the calculation of the residual life in corroding concrete reinforcements based on corrosion intensity values; 9 th European congress on corrosion, Utrecht, 1989
9. Peruš I. et al, Nov pristop pri reševanju problemov upravljanja in vzdrževanja cestnih mostov; Gradbeni vestnik, 8-9-10, 1996
10. Bjegović, D., Milčić, R., Ukrainczyk, V.: Projektiranje zaštitnog sloja armature-modeliranje toka klorida u betonu, IX Kongres Saveza društva građevinskih konstruktera Jugoslavije, Cavtat 1991, Zbornik knjiga T
11. Žnidarič J., Terčelj S.: Sistemi opazovanja in metode za ugotavljanje stanja cestnih mostov I. – III. del. Raziskovalna naloga št. 06-2685-227-88
12. Diagnosis and Assessment of Concrete Structures-State of the Art Report, CEB Bulletin No.192, 1989
13. Wicke M., et al.: Verfahren zur Vorhersage des Umfanges von Brückensanierungen, Strassenforschung, Heft 338, Wien 1987
14. Žnidarič J., Terčelj S., Marolt J.: Določitev standardov uporabnosti cestnih mostov. Številčna ocena stanja mostov-rating; Raziskovalna naloga DN 691/89
15. Žnidarič A.: Kontrola varnosti obstoječih mostov, Gradbeni vestnik, 8-9-10, 1996

NOV PRISTOP PRI REŠEVANJU PROBLEMOV UPRAVLJANJA IN VZDRŽEVANJA CESTNIH MOSTOV

New approach to the problems of bridge management

UDK 624.21 + 69.059

IZTOK PERUŠ*, LOJZE BEVC** in JAŠ ŽNIDARIČ***

P O V Z E T E K

Prispevek prikazuje tri tipične aplikacije novega pristopa pri reševanju problemov upravljanja in vzdrževanja cestnih mostov. Uporabljen je bil inteligentni sistem tipa nevronska mreža, ki v osnovi predstavlja večdimenzionalno neparametrično regresijo. V do sedaj znanih aplikacijah na področjih gradbenega konstrukterstva je poznan pod imenom ECA nevronska mreža ali CAE metoda. Na inštitutu za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo ter na Zavodu za gradbeništvo Slovenije se metoda stalno razvija in dopolnjuje. Zaradi omejenega prostora je podan le kratek pregled metode in same problematike. Namen prispevka je predvsem dati osnovno informacijo o možnostih uporabe in motivirati inženirje z drugih področij.

NEW APPROACH TO THE PROBLEMS OF BRIDGE MANAGEMENT

S U M M A R Y

In the paper three typical applications of a new approach for solving problems in bridge management and maintenance are presented. An intelligent, neural network-like system which corresponds to a multi-dimensional non-parametric regression was used. As ECA neural network and/or ACE method is known in present applications from the field of civil engineering. At the Institute of Structural and Earthquake engineering, and the Slovenian National Building and Civil Engineering Institute the method is being constantly developed and improved. Due to the limited space only a brief review of the method and both description and solution of the problems are described. The aim of this paper is to give mainly the basic information of possible applications of the presented method and to motivate engineers from other fields.

1. UVOD

Pri upravljanju in vzdrževanju cestnih mostov se pojavljajo problemi, katerih uspešno reševanje (obvladovanje) je bistvenega pomena za širšo družbeno skupnost. Pri tem

gre za zagotavljanje njihovega nemotenega obratovanja, saj omogočajo delovanje celotnega gospodarstva sistema. Realno opisovanje pojavov, ki so prisotni v teh procesih, je dokaj težavno. Močno poenostavljeni modeli dajejo le zelo približne rešitve, izdelava bolj sofisticiranih

Avtorji:

* dr., dipl. inž. gradb., zasebni raziskovalec, sodelavec Zavoda za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva 12, Ljubljana

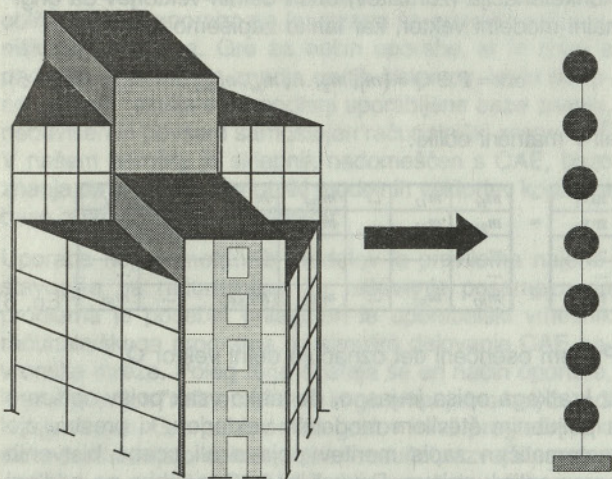
** mag., dipl. inž. gradb., Zavod za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva 12, Ljubljana

*** dipl. inž. gradb., Zavod za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva 12, Ljubljana

modelov pa je možna le na interdisciplinarnem nivoju, ki zahteva strokovnjake različnih profilov. Ne nazadnje pa boljši modeli zahtevajo tudi uporabo bolj zahtevnih in novejših metod reševanja.

V splošnem velja, da realistična obravnava naravnih pojavov sloni na meritvah in opisih, ki temeljijo na relacijah med opaženimi rezultati. S teoretičnega stališča je mogoče relacije najbolj primerno opisati z abstraktnimi matematičnimi modeli, ki opisujejo matematične zakonitosti pojavov. S praktičnega stališča pa so analogni modeli, ki se lahko simulirajo z različnimi elektronskimi napravami, na primer z računalniki, pogosto bolj enostavni in primernejši za uporabo.¹ Prav takšni modeli, ki se razvijajo na Zavodu za gradbeništvo Slovenije, so prikazani v okviru tega prispevka. Ugotovljeno je bilo, da lahko v relativno kratkem času razviti modeli dajejo enakovredne rezultate kot jih dajejo modeli ali postopki obstoječih metodologij v svetu. Z nadgradnjo modelov je mogoče rezultate relativno enostavno še precej izboljšati.

Pri opisovanju pojavov realnega sveta se je potrebno zavedati dejstva,² da se poskuša **izredno kompleksna realnost** na eni strani **opisati z izredno poenostavljenimi**, pogosto močno **abstraktnimi matematičnimi modeli** (slika 1).



Slika 1. Opis realnosti (večetažnega objekta) z abstraktnim matematičnim (pseudo-tridimenzionalnim) modelom.

V prispevku so predstavljeni modeli, povezani s problemi upravljanja in vzdrževanja cestnih mostov. V ospredju je naravni pojav, imenovan *propadanje obstoječih betonskih konstrukcij*. Pojav je kompleksen, sestavljen iz množice podpojavnih. Opis kompletnega pojava, brez delitve na podpojave in ločeno obravnavanje najbolj aktualnih, daleč presega okvire raziskovalne naloge,³ katere rezultati so prikazani, in trenutne zmožnosti znanih metod. Zato so se reševali samo tisti problemi (podpojavi), za katere se kaže največji interes v praksi in zanimanje mednarodne strokovne javnosti. To so problemi kategorizacije poškodovanosti, preostale življenjske dobe in ratinga ustreznosti obstoječih cestnih mostov.

Opisani problemi, skupaj z varnostjo obstoječih cestnih mostov, so bili do sedaj v domeni ozkega kroga (izbranih) strokovnjakov. Hitro razvijajoča se družba, v kateri narašča število betonskih konstrukcij, istočasno pa obstoječe propadajo zaradi vplivov agresivnega okolja in obtežbe, zahteva mnogo širši in bolj splošen pristop k temu problemu. Že zelo groba ocena poškodovanosti (na primer določanje ratinga poškodovanosti⁴) zahteva visoko stopnjo profesionalnosti in znanja. Zato se lahko šteje, da imajo strokovne ocene, utemeljene z znanstvenimi pristopi, tudi večjo praktično (ekonomsko!) vrednost za družbo. Iz tega razloga postajajo (profesionalne) zahteve po znanju, ki ga morajo obvladovati tovrstni strokovnjaki, zelo stroge in lahko segajo dlje od zahtev za običajne inženirje v konstrukcijskem inženirstvu.

Strogim profesionalnim zahtevam je možno zadovoljiti le z ustreznim nivojem teoretičnega znanja in dolgoletnimi izkušnjami. Ker je na eni strani število takšnih strokovnjakov omejeno, na drugi strani pa želimo zmanjšati vpliv subjektivnosti posameznih strokovnjakov, smo v okviru omenjene raziskovalne naloge nadaljevali z matematičnim reševanjem problemov ocene obstoječih mostnih konstrukcij.⁵ Namesto tako imenovanih "obrtinskih pravil" stroke, ki temeljijo na znanju in izkušnjah posameznih ekspertov, so bili (na osnovi posameznih relevantnih parametrov) izboljšani že predlagani prototipi matematičnih modelov ratinga ustreznosti in kategorizacije poškodovanosti betonskih konstrukcij. Isti pristop je bil uporabljen še pri kompleksnem (pod) problemu določanja preostale življenjske dobe betonskih konstrukcij, kjer je bil upoštevan mehanizem propadanja betona zaradi korozije armature. Pri izdelavi t.i. neparametričnih modelov je bil uporabljen inteligentni sistem tipa nevronska mreža (v različnih aplikacijah poimenovan tudi ECA nevronska mreža, CAE metoda), ki omogoča pogled na obravnavane probleme s povsem drugega zornega kota. Poudarek pri tem je bil dan predvsem na izdelavi modelerja, ki omogoča enostavno in avtomatično modeliranje vseh treh pojavov, ter praktično uporabnost dobljenih rezultatov.

2. PREGLED STANJA

Inženirski pristop k problemom trajnosti betonskih konstrukcij izvira šele iz leta 1960. Intenzivnejše zanimanje graditeljev in drugih strokovnjakov, ki se vključujejo v to problematiko, se kaže na mednarodnih kongresih o trajnosti gradiv v letih 1978, 1981 in 1984. Kongresi so od takrat naprej vsaka tri leta in jih skupno organizirajo RILEM, CEB, ACI in CANMET (glej ref. 6, 7, 8, 9, 10 in 11). Leta 1981 sta RILEM in CEB osnovala skupno tehnično komisijo "napovedovanje življenjske dobe gradiv in elementov", potem pa je sledila vrsta drugih projektov na isto temo (glej na primer ref. 12, 13 in 14).

Očitno je, da v svetu potekajo zelo intenzivne raziskave. Ker je problemsko področje izredno široko, smo se v pregledu literature (relevantnih raziskav) omejili samo na raziskave, ki so neposredno povezane s problemi, prikazanimi v prispevku.

Za kategorizacijo poškodovanosti v svetu še ni posebno natančnih modelov. Zaenkrat je mogoče kategorijo poškodovanosti določiti po kriterijih, ki jih predpisuje CEB.¹⁵ Le-ta se določa glede na najbolj kritično oceno po posameznem parametru.

Podobna situacija je pri določanju ratinga ustreznosti. Sodobne metodologije, na primer ameriška,¹⁶ podajajo razne zelo približne obrazce. Žal se rezultati takšnih modelov med seboj bistveno razlikujejo. Opazen je močan vpliv subjektivnosti in lokalnih značilnosti posameznih držav ZDA.

Pri napovedovanju preostale življenjske dobe je bilo narejenega dosti več. Ker gre za izredno kompleksen problem, so zaenkrat razviti le zelo enostavni in približni, bolj ali manj teoretični modeli. Večina raziskav je zato omejena na raziskave prevladujočih mehanizmov propadanja betona, ki predstavljajo izhodiščne podatke za napoved preostale življenjske dobe betonskih konstrukcij.

Mnogo raziskovalcev se ukvarja s preiskavami obstojnosti betona, ki je odvisna od možnosti prodiranja agresivnih snovi v beton. Osnovni parametri prepustnosti porozne strukture cementnega kamna oziroma transporta vode v beton so vpijanje, difuzija in tečenje fluidov pod pritiskom. Na te parametre pa odločilno vplivajo homogenost, poroznost in vlažnost betona, na samo obstojnost pa tudi obstoj razpok in geometrija prereza konstrukcijskih elementov. Vse opisane parametre lahko ocenimo le s preskušanjem in z dolgotrajnim opazovanjem relevantnih lastnosti betona v konstrukciji in samo obnašanje konstrukcije pri teh lastnostih. Jasno je, da pridejo v poštev samo neporušne metode preskušanja. Do danes so bili že razviti postopki za nekatere metode, ki temeljijo na fizikalnih modelih.

Vsi predhodno naštetih modeli so razviti klasično. Le nekateri novejši modeli so razviti s probabilističnim pristopom.^{17, 18} Pristop, ki povezuje hkrati postopke umetne inteligence in probabilistični pristop, pa je uporaba sistemov tipa nevronska mreža. Grabec, ki je razvil enega takšnih sistemov,¹⁹ ga uporablja pri modeliranju različnih fizikalnih pojavov (glej na primer ref. 20). Kot kažejo raziskave uporabe takšnih inteligentnih sistemov na področju potresnega inženirstva,²¹ je možno sistem s primerno predelavo in prilagoditvijo uporabiti tudi na drugih področjih gradbene stroke.

3. OSNOVNI PRINCIPI NOVEGA PRISTOPA

V formulaciji modelerja (imenovali ga bomo CAE, po angleški kratki iz **C**onditional **A**verage **E**stimator), s katerim bomo lahko pripravili neparametrične modele pojavov, bomo predpostavili, da lahko z enim opazovanjem pojav delno opišemo z L spremenljivkami m_i . Zato lahko vsako opazovanje v matematični obliki predstavimo z vektorjem, tako imenovanim modelnim vektorjem:

$$\mathbf{mv} = (m_1, m_2, \dots, m_L) \quad (\text{En. 1})$$

Za opis celotnega pojava potrebujemo čimveč takšnih

informacij. Predpostavimo, da je pojav v celoti opisan s končnim številom meritev ali opazovanj (N), ki jih zapišemo v tako imenovani bazi podatkov ali bazi znanja – le-ta vsebuje N modelnih vektorjev:

$$\text{model} = \{\mathbf{mv}_1, \mathbf{mv}_2, \dots, \mathbf{mv}_N\} \quad (\text{En. 2})$$

Izraz /2/ lahko v matrični obliki zapišemo kot:

$\mathbf{mv}_1$	=	m_{11}	m_{12}	...	m_{1L}
$\mathbf{mv}_2$	=	m_{21}	m_{22}	...	m_{2L}
...		...			...
...		...			...
$\mathbf{mv}_N$	=	m_{N1}	m_{N2}	...	m_{NL}

(En. 3)

V nadaljevanju predpostavimo, da je vsak modelni vektor sestavljen iz dveh delov: prvi del predstavlja vhodne spremenljivke pojava, drugi del pa izhodne spremenljivke pojava. Prvi vektor bomo označili s $\mathbf{P}$, drugega pa s $\mathbf{Q}$:

$$\begin{aligned} \mathbf{P} &= (m_1, m_2, \dots, m_M, \#) \dots \text{vhodne spremenljivke} \\ \mathbf{Q} &= (\#, m_{M+1}, m_{M+2}, m_L) \dots \text{izhodne spremenljivke} \end{aligned} \quad (\text{En. 4})$$

Konkatenacija (združitev) obeh delnih vektorjev da originalni modelni vektor, kar lahko zapišemo kot:

$$\mathbf{mv} = \mathbf{P} \oplus \mathbf{Q} = (m_1, m_2, \dots, m_M, m_{M+1}, \dots, m_L) \quad (\text{En. 5})$$

ali v matrični obliki:

$\mathbf{mv}_1$	=	m_{11}	m_{12}	...	m_{1M}	$m_{1,M+1}$	...	m_{1L}
$\mathbf{mv}_2$	=	m_{21}	m_{22}	...	m_{2M}	$m_{2,M+1}$	...	m_{2L}
...		...						...
...		...						...
$\mathbf{mv}_N$	=	m_{N1}	m_{N2}	...	m_{NM}	$m_{N,M+1}$	...	m_{NL}

(En. 6)

Pri tem osenčeni del označuje delni vektor $\mathbf{Q}$.

Iz kratkega opisa je jasno, da lahko vsak pojav opišemo s poljubnim številom modelnih vektorjev, ki predstavljajo matematičen zapis meritev pojava ali ocene bistvenih spremenljivk pojava. Privzeli bomo, da lahko na podlagi zbranih podatkov in na podlagi primerne ureditve baze podatkov, ki jo imenujemo baza znanja, zadovoljivo opišemo vsak naravni pojav. Vse, kar mora bralec vedeti v nadaljevanju, je poznavanje zgoraj opisanega načina zapisa pojava. Povezave posameznih modelov z navedenimi izrazi bomo podali v kasnejših podglavljih. Zahtevnejši bralec pa lahko, kot smo že omenili, teoretične osnove metode in nadaljnje izpeljave najde v člankih, podanih v spisku literature.

Enačbo za CAE lahko zapišemo v kompaktni obliki, ki je zelo enostavna in primerna za direktno kodiranje v računalniški program.²¹

$$q_k = \sum_{n=1}^N A_n \cdot q_{nk}, \quad A_n = \frac{c_n}{\sum_{j=1}^N c_j}, \quad c_n = \exp \left[-\sum_{i=1}^M (p_i - p_n)^2 / 2\sigma^2 \right] \quad (\text{En. 7})$$

Pri tem posamezni členi pomenijo:

- q_k – k -ti iskani parameter problema; k bo v naših primerih vedno enak 1,
- q_{nk} – isti izhodni parameter, ki pripada n -temu znanemu primeru iz baze znanja,
- p_{ni} – i -ti vhodni parameter n -tega znanega primera v bazi znanja,
- p_j – i -ti vhodni parameter primera, za katerega želimo določiti iskano vrednost,
- N – število znanih primerov v bazi znanja,
- M – število vhodnih parametrov pojava; M je v naših primerih večji ali enak 4.

Za razliko od običajnega, klasičnega pristopa k modeliranju naravnih pojavov je lahko pristop z izdelavo neparametričnih modelov enostavnejši in bolj prilagojen inženirskemu načinu razmišljanja. Seveda se tudi tu ne moremo izogniti nekaterim predpostavkam. Problem pa lahko poenostavimo tako, da uporabimo primeren zapis oziroma predstavitev spremenljivk pojava. S posebnimi postopki, ki temeljijo na statistični obdelavi podatkov, je mogoče izločiti manj pomembne (nebistvene) spremenljivke pojava, tako, da dobimo predstavitev pojava z obvladljivim številom spremenljivk. Pri tem je osnovna zahteva, da so te spremenljivke enostavno merljive in/ali opisljive.

Neparametrični modeli ne dajejo rešitve v eksplicitni obliki, njihova uporaba pa je vezana na uporabo računalniškega programa. Gre za način uporabe, ki je znan s področja uporabe na znanja oprtih sistemov, ko je sklepnik, ki daje rezultate na podlagi uporabljene baze znanja, neodvisen in povsem samostojen računalniški program.²⁶ V našem primeru je sklepnik nadomeščen s CAE, bazo znanja pa predstavlja v obliki modelnih vektorjev kodirana baza znanja ali baza podatkov.

Uporaba neparametričnih modelov je praviloma najenostavnejša na računalniku. Za reševanje posameznega problema je posebej prilagojen le uporabniški vmesnik računalniškega programa, ki simulira delovanje CAE nevronske mreže. Poleg tega obstaja še en način uporabe, ki je namenjen "ročnemu" delu in ga omenjamo bolj zaradi kompletnosti. Gre za uporabo grafov in/ali preglednic, ki sicer predstavljajo dokumentiran rezultat razvoja neparametričnega modela. Grafični prikaz rezultatov daje pogosto zelo dobro informacijo o pojavu oziroma vplivu posameznih spremenljivk, kar je lahko izrednega pomena pri inženirski presoji.

4. NEPARAMETRIČNI MODELI

4.1 Model ratinga ustreznosti za cestne mostove (RU)

4.1.1. Splošno

Računski model za rating ustreznosti mora nujno upoštevati več spremenljivk. Le takšno orodje omogoča upravljalcu obstoječih cestnih mostov racionalno gospodarjenje. V praksi drugod po svetu se uporabljajo zelo enostavna pravila. V ZDA, na primer, se obstoječi mostovi v prvi razvrstitvi sortirajo po velikosti določenih ratingih poškodovanosti. Objekti z najvišjimi ocenami se še detajlno

analizirajo – eksperti upravljalca, ki imajo na razpolago natančne podatke o teh mostovih, izvršijo revizijo tako določene prve razvrstitve. Ker se upošteva ena sama ocena, lahko pride do napak. Tudi razvrstitve močno poškodovanih mostov po različnih metodologijah se precej razlikujejo. Razlike so vsekakor precej večje, kot bi bilo logično pričakovati glede na enake predpostavke pri uporabljenih modelih. Nazadnje se tudi subjektivnosti posameznih ekspertov ali skupini ekspertov ni mogoče povsem izogniti.

V svetu se za določitev ratinga ustreznosti uporabljajo različni izrazi, ki se močno razlikujejo od države do države. Trenutno najbolj izdelano metodologijo najdemo v ZDA.¹⁶ Rating ustreznosti se v splošnem določa na osnovi štirih parametrov: nosilnosti mosta, ocene preostale življenjske dobe, svetle širine mosta in višine podvoza oziroma nadvoza (zadnja dva parametra predstavlja po vrsti funkcionalnost in pomen objekta v cestni mreži!). Pri tem imajo parametri uteži, ki se med posameznimi državami močno razlikujejo. Velike razlike pri utežeh za isti parameter kažejo na precejšen vpliv subjektivnosti, različne poglede na problematiko, neupoštevanje ostalih pomembnih parametrov pri ratingu ustreznosti itd. Za rešitev se povrh uporabljajo še linearni nastavki, kar je pri tako zahtevnem problemu le zelo grob približek.

4.1.2. Osnovni parametri v oceni ratinga ustreznosti

Ocena ratinga ustreznosti predstavlja enega ključnih podatkov pri upravljanju cestnih mostov, določa pa se na podlagi več pomembnih parametrov. V okviru prikazanih raziskav, ki predstavljajo logično nadaljevanje predhodne raziskovalne naloge na podobno temo,⁴ smo v oceni ratinga ustreznosti upoštevali iste štiri pomembne parametre. To so:

- varnostni indeks β ,
- rating poškodovanosti ali indeks stanja objekta C_F ,
- preostala življenjska doba R_L in
- pomen objekta v cestni mreži ali pomembnost objekta I_F .

Varnostni indeks β omogoča izražavo nosilnosti mosta na probabilističen način (višja je vrednost, večja je rezerva v nosilnosti in obratno). Rating poškodovanosti C_F predstavlja številčno oceno stanja mosta oziroma stopnjo poškodovanosti objekta. Določa se na podlagi rednih ali glavnih pregledov mostov po metodologiji številčnega vrednotenja vseh ugotovljenih poškodb. Preostala življenjska doba R_L je eden najpomembnejših parametrov v oceni ratinga ustreznosti mostov. Napoved temelji na matematičnem modelu prevladujočega mehanizma propadanja materiala konstrukcije (korozija jekla za armiranje in prednapenjanje, propadanje betona zaradi agresivnega okolja). Pomen objekta v cestni mreži I_F določi oziroma predpiše upravljalec.

Za primer matematičnega obravnavanja problema je potreben še dogovor o številčnih vrednostih, ki jih bodo zavzemali objekti v oceni. Velikost zgornjih in spodnjih mej je pravzaprav nepomembna, saj gre pri ratingu ustreznosti le za primerjavo različnih objektov med seboj.

Privzete vrednosti se nahajajo v razponu od 0 do 10.

4.1.3. Matematična formulacija problema

Problem primarne razvrstitve mostov lahko v matematični obliki zelo splošno zapišemo kot

$$pr = pr(\beta, C_F, R_L, I_F) \tag{En. 8}$$

Izkušnje kažejo, da je zelo težko podati zaključene matematične izraze za rating ustreznosti, ki bi smiselno in dovolj natančno zajemali ekspertno znanje. To je bil eden izmed glavnih razlogov, da smo se lotili izdelave modela, ki ne bo dal rešitve v zaključeni obliki. Pri pripravi modela se moramo zavedati, da so osnovne relacije med oceno ratinga ustreznosti in posameznimi vplivnimi parametri jasne. Zaradi narave uporabljene metode tudi ni pomembna povezanost (odvisnost) med posameznimi parametri, kar precej olajša delo.

Enačbo 7 lahko zapišemo v zaključeni obliki samo za oceno ratinga ustreznosti:

$$c_n = \exp \left[\frac{(\beta - \beta_n)^2 + (C_F - C_{Fn})^2 + (I_F - I_{Fn})^2 + (R_L - R_{Ln})^2}{2\sigma^2} \right] \tag{En. 9}$$

in končno

$$pr = \sum_{n=1}^N r_n \cdot \frac{c_n}{\sum_{j=1}^N c_j} \tag{En.10}$$

4.1.4. Modeliranje pojava in verifikacija modela

S področja uporabe nevronske mreže je dobro znano, da

le-te zelo dobro napovedujejo v primeru interpolacije rezultatov in slabo v primeru ekstrapolacije; še slabše, pogosto lahko dajo precej nepredvidene in napačne rezultate. To seveda ni problem nevronske mreže kot orodja ampak problem reprezentativnosti baze znanja.

Problem lahko rešimo tako, da upoštevamo vse možne kombinacije ekstremnih vrednosti vhodnih parametrov. S tem pa verjetna nelinearnost rešitve še ni zagotovljena, zato je logična izbira dodatnih primerov. Te smo v našem primeru izbrali na sredinah robov, v središčih vseh stranskih ploskev in v središču hiperkocke z dimenzijami: minimalna vrednost po vsakem vhodnem parametru, maksimalna vrednost po vsakem izhodnem parametru.

Ker gre za šibko definiran problem, verifikacija modela v pravem pomenu besede ni mogoča. Obstoječe rešitve so lahko namreč prav tako vprašljive kot rezultati neparametričnega modela. Zato en del ocene uspešnosti modela predstavlja ocena grafičnega prikaza rešitve, ki je na tem mestu zaradi pomanjkanja prostora ne prikazujemo. Drugo potrditev uspešnosti modela je mogoče dobiti na podlagi primerjave rezultatov neparametričnega modela z ekspertnimi rešitvami. Najprej so objekte razvrščali trije eksperti neodvisno. Nato smo primarno razvrstitev določili še z modelom RU. Rezultati so prikazani v preglednici 1.

Razlike med posameznimi eksperti so v nekaterih primerih kar precejšnje. Rezultati, dobljeni z modelom RU, dajejo v grobi oceni povprečje rezultatov vseh ekspertov. Razlika v rezultatih nastopa predvsem zaradi dveh vzrokov:

- 1. nelinearnosti modela RU in
- 2. upoštevanja zahtev v modelu, t.j. višjih ocen pri bolj kritičnih razmerah.

Preglednica 1: Primerjava ocen ratinga ustreznosti (oznake od A do N predstavljajo oznake mostov).

ekspert 1	ekspert 2	ekspert 3	povprečje	model RU
(8.0) L	(9.5) L	(8.5) A	(8.50) L	(9.00) L
(8.0) I	(9.0) A	(8.0) L	(8.17) A	(8.95) A
(7.0) A	(7.5) F	(7.0) F	(6.83) F	(8.62) B
(7.0) B	(7.5) C	(7.0) E	(6.33) I	(8.37) F
(7.0) E	(5.5) I	(6.5) B	(5.83) C	(8.23) E
(7.0) J	(4.0) N	(5.5) J	(5.50) E	(8.09) I
(6.0) F	(3.0) J	(5.5) I	(5.17) J	(7.89) C
(6.0) H	(2.5) E	(5.0) C	(5.00) B	(6.92) J
(5.0) C	(2.5) H	(4.5) H	(4.33) H	(6.92) N
(5.0) G	(2.0) K	(3.5) M	(3.67) N	(6.29) M
(4.0) N	(1.5) B	(3.0) K	(3.07) G	(4.99) H
(3.0) K	(1.2) G	(3.0) N	(2.67) K	(4.68) G
(2.0) M	(1.0) M	(3.0) G	(2.17) M	(4.29) K
(1.0) D	(1.0) D	(1.5) D	(1.17) D	(1.00) D

Tretjo potrditev uspešnosti modela smo dobili na podlagi močno poenostavljenega primera, kjer se rating ustreznosti določa samo na podlagi pomembnosti objekta in ratinga poškodovanosti. Rezultate smo primerjali s predlogom za nacionalni program 1995, ki je bil narejen zelo približno. Ugotovili smo, da daje model RU podobne, vendar bolj logične rezultate.

4.2. Model kategorizacije poškodovanosti armirano-betonskih konstrukcij mostov (KP)

4.2.1. Splošno

Poškodbe objekta, ki so posledice obtežbe ali propadanja, je potrebno v doglednem času, v odvisnosti od vrste in obsega poškodb, ustrezno sanirati. Zanesljiv projekt sanacije pa je mogoče pripraviti na podlagi detajlnega pregleda poškodovane konstrukcije. Rezultati takšnih terenskih in nato laboratorijskih meritev določajo različne **kategorije poškodb** posameznih delov konstrukcije, ki rabijo kot osnova za odločitve o obsegu in vrsti sanacije.

Problem določanja kategorije poškodb v svetu še ni zadovoljivo rešen. V okviru predhodnega raziskovalnega projekta⁴ smo že razvili preprost prototip modela, ki je na podlagi petih pomembnih parametrov določal kategorijo poškodovanosti mikrolokacije. Prototip modela je omogočal zvezne prehode med posameznimi kategorijami, kar je trenutno še velika pomanjkljivost obstoječih modelov drugod po svetu. Tako na primer CEB¹⁵ iz leta 1989 predlaga tabelarično podane meje, ki veljajo za posamezne karakteristične poškodbe betonske konstrukcije. Kategorizacija dela konstrukcije (mikrolokacije) se določi tako, da se upošteva najbolj kritična posamezna ocena. Takšna poenostavitev v splošnem ni sprejemljiva in lahko pogosto vodi do nelogičnih zaključkov, predvsem če jih primerjamo z vizualnimi ocenami kategorizacije.

4.2.2. Osnovni parametri v oceni kategorizacije poškodovanosti AB konstrukcij

V osnovi se je kategorija poškodovanosti mikrolokacije, kljub temu, da so bili znani tudi ostali parametri, določala samo na podlagi petih. Takšen pristop je logičen, saj se sklada z veljavnimi, vendar preprostimi računskimi modeli, ki obravnavajo proces korozije armature. Kategorija poškodovanosti je bila tako določena na podlagi kombinacije vizualne ocene (ki v prototipnem modelu ni bila upoštevana, glej ref. 4) in računskih kriterijev za pet upoštevanih parametrov. Ti so bili:

- vsebnost klorovih ionov na težo cementa (%),
- alkalnost betona (pH vrednost),
- (verjetnost) proces(a) korozije, ki se izraža z elektropotenciali (mV),
- absorpcija betona po metodi ISAT ($\text{ml/m}^2/\text{s}$) in
- plinoprepustnost betona po metodi APIS (m^2).

Za izboljšanje ocene kategorizacije smo v novem modelu vpeljali nekaj novih parametrov, med katerimi so tudi vizualni opisi mikrolokacije. Pri tem se moramo zavedati, da moramo pri obvladljivih problemih vedno paziti na primerno (ne preveliko) število vhodnih parametrov. Njihov

natančnejši opis je mogoče najti v ref. 3. To so:

- vlažnost betona, povezana s površinskimi poškodbami betona,
- razpoke,
- trgalne napetosti površinske plasti betona,
- globina karbonatizacije in
- parameter, ki zajema vpliv razširjenosti (in jakosti) poškodb.

4.2.3. Modeliranje pojava in verifikacija modela

Razpoložljiva baza znanja vsebuje majhno število modelnih vektorjev. Problem smo matematično formulirali podobno kot pri oceni ratinga ustreznosti, le da smo uporabili več spremenljivk pojava in da baza znanja predstavlja podatke konkretnih meritev.

Na sliki 2.a je prikazan tipičen rezultat modela KP. Kot lahko oceni večina inženirjev, daje model logične rezultate. Očitno je namreč, da je vpliv zamakanja in razpokanosti mikrolokacije na kategorizacijo precej velik. Na sliki so vrednosti v grafu za obe spremenljivki razdeljene na 10 enakih delov. Za opisne spremenljivke so po dogovoru vrednosti v spodnjem levem vogalu enake 0, v spodnjem desnem in zgornjem levem pa 1. Kategorija poškodovanosti je prikazana z izolinijami enakih vrednosti, ki so označene v sliki.

Slika 2.b prikazuje primerjavo med napovedanimi ocenami modela KP in ekspertnimi ocenami. Pri tem velja opozoriti, da za dva primera iz pete kategorije, ki najbolj odstopata, ni znanih večina merjenih parametrov. Za ostale primere je očitna dobra korelacija, kar govori v prid izdelanemu modelu. Ob tem je pomembno dejstvo, da so razlike med CEB-ovimi in ekspertnimi ocenami bistveno večje (CEB-ova pravila v nekaterih primerih vodijo do nelogičnih zaključkov!).

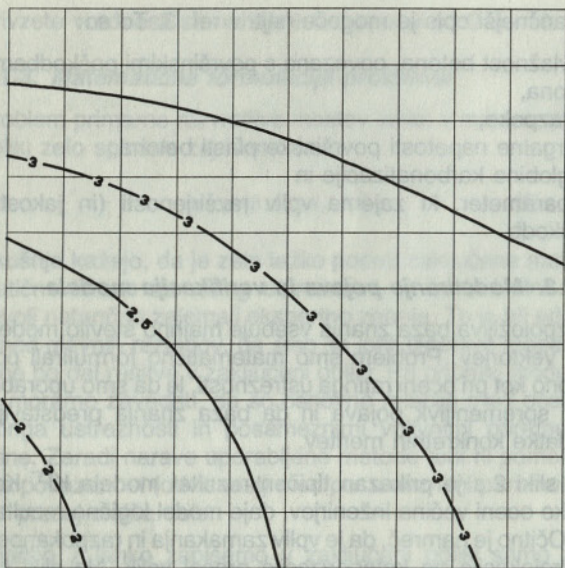
4.3. Model preostale življenjske dobe (PŽD)

4.3.1. Splošno

Inženirske modele za napovedovanje preostale življenjske dobe lahko v splošnem razdelimo v tri skupine:⁵

- empirični modeli,
- fizični modeli in
- matematični modeli, ki opisujejo matematične zakonitosti naravnega pojava propadanja betonskih konstrukcij.

Empirični modeli predstavljajo prehod od tradicionalnega k inženirskemu obravnavanju problemov trajnosti betonskih konstrukcij. Določijo se na podlagi meritev pojava. *Fizični modeli* temeljijo na zahtevni shemi /1/ definicije problema, /2/ priprave raziskav, /3/ preliminarne in /4/ detajlnega preskušanja in končno /5/ analize rezultatov in izdelave modelov. *Matematični modeli*, kot zadnji, opisujejo posamezne zakonitosti propadanja betonskih konstrukcij. Gre za pojave transporta agresivnih snovi skozi heterogeno porozno betonsko strukturo ter pojave korozije in drugih vrst razpadanja betona. Velja omeniti, da obstaja na zadovoljivi inženirski ravni le nekaj modelov za tipične pojave.



/a/ upoštevanje zamakanja (horizontalno: 0-1)
in razpok (vertikalno: 0-1).

Slika 2. Rezultati modela KP

Najbolj pereč problem pri pojavu propadanja betonskih konstrukcij je korozija armature, ki v splošnem nastopa zaradi *prodiranja kloridov v beton*. Zato pod imenom model PŽD v tem prispevku, razen splošne formulacije, natančneje prikazujemo le modeliranje procesa prodiranja kloridov.

4.3.2. Matematična formulacija problema

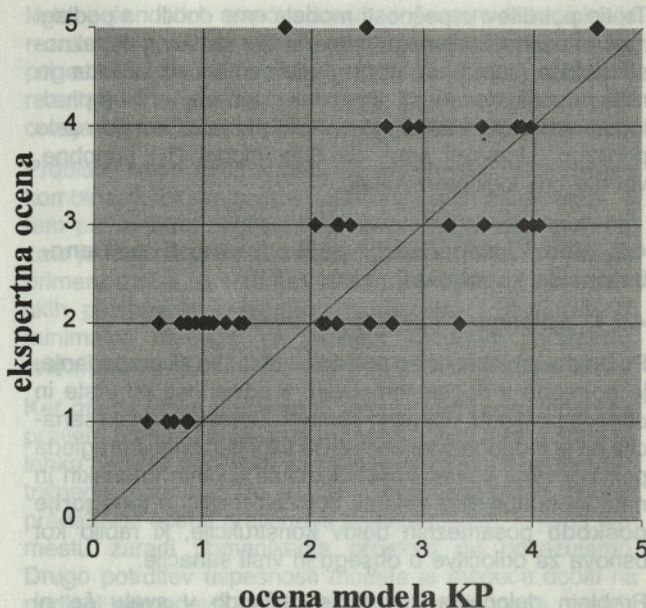
Pojav prodiranja kloridov v beton je mogoče v matematični obliki opisati s parcialnimi diferencialnimi enačbami, ki opisujejo difuzijo – gibanje snovi – skozi beton zaradi kemičnega, vlažnostnega ali temperaturnega potenciala. Drugi Fickov zakon, ki pojav opisuje, je zapisan kot:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (\text{En. 11})$$

Pri tem pomeni:

- $\frac{\partial C}{\partial t}$ – sprememba koncentracije kloridov s časom,
 $\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$ – sprememba koncentracije kloridov po preseku betonskega elementa in
 D – koeficient difuzije.

Pri tem velja omeniti, da sicer zahtevna parcialna diferencialna enačba velja za idealiziran, enodimenzionalen primer prodiranja kloridov v beton. Za zahtevnejše robne pogoje se enačba 11 rešuje numerično. Za enostaven



/b/ primerjava med napovedano (model KP) in ekspertno oceno

primer prodiranja kloridov v beton se lahko rešitev zapiše v obliki:

$$C(x, t) = C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{\tau}} \right) \right] \quad (\text{En. 12})$$

Pri tem so:

- x – globina,
 t – čas,
 $C(x, t)$ – koncentracija kloridov na globini x v času t ,
 C_0 – začetna koncentracija kloridov,
 erf – funkcija napake in

$$\tau = \int_0^t D(t_1) dt_1 \quad (\text{En. 13})$$

Enačba 13 predstavlja izraz za spremenljivko, ki opisuje časovno odvisnost koeficienta difuzije.

Enačbe 11, 12 in 13 predstavljajo matematičen model prodiranja kloridov v beton. Pri tem je razporeditev kloridov po globini in po času odvisna od dveh spremenljivk: začetne koncentracije kloridov in koeficienta difuzije. Meritve na mostovih pa so pokazale, da je lahko razporeditev bistveno drugačna, kot jo daje enačba 12. Zato je potrebno bolj splošno obravnavanje modela.

Za del konstrukcije – mikrolokacijo – lahko preostalo življenjsko dobo v splošni obliki zapišemo kot:

$$R_i = R_i(p_1, p_2, \dots, p_i) \quad (\text{En. 14})$$

Pri tem p_i predstavlja i -ti proces razpadanja betona.

Vsak posamezen proces razpadanja betona pa je spet funkcija spremenljivk betona in vplivov okolja, v katerem

se konstrukcija nahaja. Formalno lahko zapišemo podobno enačbo, kot je enačba 14, tudi za vsak n -ti proces razpadanja betona:

$$p_n = p_n(x_1, x_2, \dots, x_i) \quad (\text{En. 15})$$

Pri tem x_i predstavlja i -to spremenljivko n -tega procesa razpadanja betona.

Enačbo 15 lahko sedaj zapišemo tudi kot:

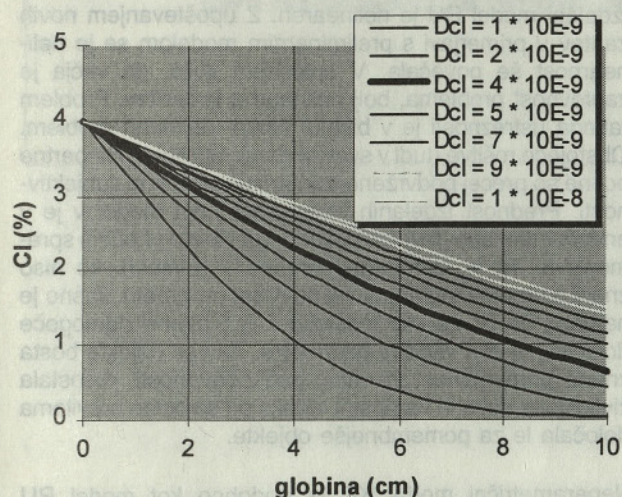
$$R_L = R_L(p_{x1,1}, p_{x1,2}, \dots, p_{x1,j}, \dots, p_{xi,1}, p_{xi,2}, \dots, p_{xi,j}) \quad (\text{En. 16})$$

Pri tem $p_{xi,j}$ predstavlja i -to spremenljivko x -tega procesa razpadanja betona. Pri kompletnem opisu pojava propa-

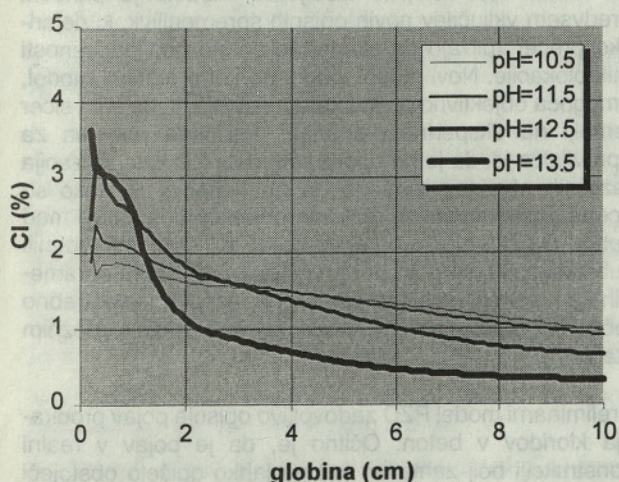
danja betonskih konstrukcij lahko zapišemo, če upoštevamo, da je preostala življenjska doba $t = R_L$:

$$\pi = (p_{x1,1}, p_{x1,2}, \dots, p_{x1,j}, \dots, p_{xi,1}, p_{xi,2}, \dots, p_{xi,j}, t) \quad (\text{En. 17})$$

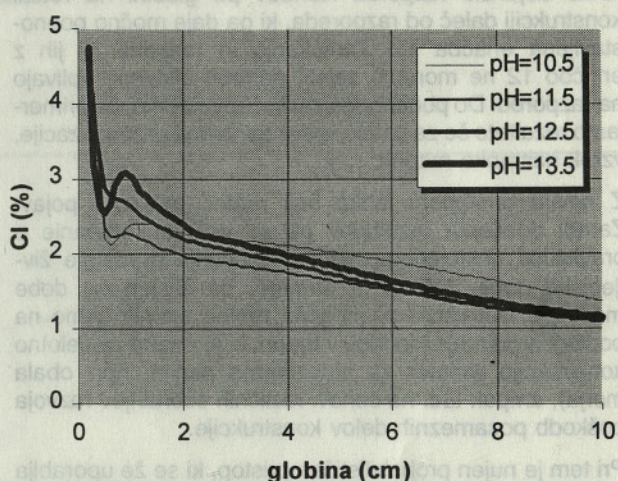
Enačba 17 predstavlja formalno enak zapis, kot smo ga predstavili v prvem delu prispevka (glej enačbo 5). Jasno je, da je opis pojava bolj zahteven, če upoštevamo več spremenljivk. Jasno pa je tudi, da lahko vključimo poljubne, mehkeje opise spremenljivk pojava. Iz enačbe 17 je razvidno tudi, da je mogoče pojav propadanja betonskih konstrukcij opisati z modelnimi vektorji, ki ustrezajo različnim kombinacijam spremenljivk pojava. Modelne vektorje pa smo, kot je bilo že omenjeno, dobili na podlagi meritev na posameznih mikrolokacijah obstoječih cestnih mostov.



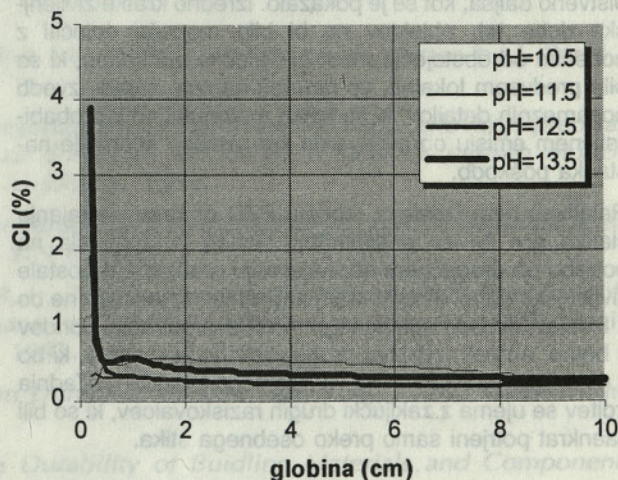
/a/ En. 12 pri $C_o=4\%$



/b/ model PŽD pri različnih globinah karbonatizacije za primer srednje močnega zamakanja in srednjih razpok betona.



/b/ model PŽD pri različnih globinah karbonatizacije za primer močnega zamakanja in delaminiranega betona



/d/ model PŽD pri različnih globinah karbonatizacije za primer šibkega zamakanja in brez razpok betona.

4.3.3. Modeliranje pojava in verifikacija modela

Za razliko od večine raziskovalcev pri določanju preostale življenjske dobe pri prodiranju kloridov v beton smo poleg spremenljivk v enačbi 12 vpeljali še dodatne opisne spremenljivke mikrolokacije na konstrukciji. To so:

- zamakanje (0-1),
- razpoke (0-1),
- časovni potek zamakanja (0-1) in:
- vzrok nastanka razpok (0-1).

Kot kaže primerjava slike 3.a s slikami 3.b, 3.c in 3.d, je lahko dejanski raspored kloridov po globini na realni konstrukciji daleč od razporeda, ki ga daje močno poenostavljena enačba 12. Zamakanje in razpoke, ki jih z enačbo 12 ne moremo zajeti, namreč bistveno vplivajo na raspored. Do podobnega zaključka pridemo, če primerjamo rezultate še za ostale vplive (globina karbonatizacije, vzrok nastanka razpok, ...).

Z novim pristopom lahko bolj realno opišemo pojav. Zaradi dobljenih rezultatov pa se vsiljuje vprašanje o pravilnosti obstoječega načina določanja preostale življenjske dobe. Očitno je namreč, da življenjske dobe mostne konstrukcije ni mogoče realno oceniti samo na podlagi prodiranja kloridov v beton, ki je enako za celotno konstrukcijo (primer za stacionarna okolja, npr. obala morja), ampak tudi na osnovi različnih scenarijev razvoja poškodb posameznih delov konstrukcije.

Pri tem je nujen probabilističen pristop, ki se že uporablja pri oceni varnostnega indeksa β . Trditev opravičuje tudi trenutno stanje nekaterih premostitvenih objektov na obstoječih prometnicah. Njihova projektirana (ali predvidena) življenjska doba je bila kljub vplivom agresivnega okolja bistveno daljša, kot se je pokazalo. Izredno kratke življenjske dobe teh objektov ne bi bilo mogoče določiti z nobenim od obstoječih modelov. Močne poškodbe, ki so bile predvsem lokalne, so namreč nastale zaradi izvedb posameznih detajlov, ki jih lahko matematično v probabilističnem smislu obravnavamo kot različne scenarije nastanka poškodb.

Relativno hitra izdelava modela PŽD (v času nastajanja članka gre še za preliminarni model) je opozorila na potrebo po drugačnem obravnavanju problema preostale življenjske dobe. Prioriteta pri nadaljnjih raziskavah ne bo v izdelavi čimbolj natančnega modela prodiranja kloridov v beton, ampak izdelava probabilističnega modela, ki bo v močni povezavi z oceno varnostnega indeksa β . Zadnja trditev se ujema z zaključki drugih raziskovalcev, ki so bili zaenkrat potrjeni samo preko osebne stika.

5. ZAKLJUČKI

Uporabljen pristop omogoča relativno enostavno opisovanje različnih pojavov pri problemih upravljanja in vzdrževanja cestnih mostov. Možno je enostavno zbiranje,

kontrola, popraviljanje, prikazovanje in ne nazadnje tudi vključevanje ekspertnega znanja v modele. Ker so stopki sedaj avtomatizirani, so se tudi ob uporabi novega pristopa prej zamudne in dolgotrajne faze precej skrajšale.

Končni rezultat razvoja neparametričnih modelov ni izraz v zaključni obliki. Rezultate je mogoče prikazati v obliki grafov ali preglednic, sicer pa je za praktično rabo priporočljiva uporaba računalniškega programa. Rezultati kažejo, da so obravnavani problemi nelinearni. Glede na primerjavo z obstoječimi rezultati lahko sklenemo, da so obstoječe rešitve približne. Nov pristop se je izkazal za primerne, saj dajejo izdelani modeli podobne ali boljše rezultate od obstoječih modelov.

Izdelani model RU je nelinearen. Z upoštevanjem novih zahtev v primerjavi s preliminarim modelom se je nelinearnost še povečala. V splošnem velja, da večja je zahtevnost problema, bolj nelinearna je rešitev. Problem ratinga ustreznosti je v bistvu "šibko" definiran problem. Obstoječe rešitve (tudi v svetovnih razmerah) in ekspertne ocene so precej podvržene trenutnim vplivom in subjektivnosti. Prednost izdelanih neparametričnih modelov je v enostavnem upoštevanju poljubnega števila vhodnih spremenljivk. To je izrednega pomena v primerih, ko niso znani oziroma izračunani vsi potrebni parametri. Jasno je namreč, da bo za vse mostove v R Sloveniji nemogoče določiti vse štiri vhodne parametre. Za vse objekte bosta znana pomembnost in rating poškodovanosti, preostala življenjska doba in varnostni indeks pa se bosta praviloma določala le za pomembnejše objekte.

Neparametrični model KP je podobno kot model RU nelinearen. Rezultati prototipnega modela KP so omogočili bistveno dopolnitev in izboljšavo novega modela. Namesto petih spremenljivk je v novem modelu upoštevanih deset spremenljivk. Izboljšavo modela je prinesla predvsem vključitev novih opisnih spremenljivk, ki dejansko precej vplivajo na ekspertno oceno poškodovanosti mikrolokacije. Novi model, podobno kot prototipni model, omogoča objektivno oceno kategorizacije, ki deloma sicer temelji na ekspertnem znanju. Izrednega pomena za upravljalca je, da je pri uporabi modela KP kategorizacija različnih objektov izvršena na enak način. Le tako so ocene poškodovanosti različnih objektov primerljive med seboj. Da bi se pri uporabi modela KP v praksi izognili subjektivnosti, so potrebni pri nekaterih vhodnih parametrih še natančni opisi (na primer, pri razpokah je potrebno točno definirati številčne vrednosti, ki ustrezajo možnim stanjem).

Preliminarni model PŽD zadovoljivo opisuje pojav prodiranja kloridov v beton. Očitno je, da je pojav v realni konstrukciji bolj zahteven kot ga lahko opišejo obstoječi poenostavljeni matematični modeli (glej En. 12). Zaključki, dobljeni na podlagi rezultatov modela PŽD, so opozorili, da se bo potrebno problema preostale življenjske dobe lotiti na drugačen način. Kot alternativna rešitev se kaže probabilističen pristop, ki je podoben pristopu določanja varnostnega indeksa β .

ZAHVALA

Prispevek je rezultat raziskovalnega dela v okviru aplikativnega raziskovalnega projekta, ki ga financirata Ministrstvo za znanost in tehnologijo Republike Slovenije in Ministrstvo za promet in zveze, Direkcija Republike Slovenije za ceste. Delo poteka na Zavodu za gradbeništvo Slovenije. Avtorji se zahvaljujejo tudi ostalim sodelavcem na projektu za njihovo pomoč.

LITERATURA

1. Grabec, I. & Sachse, W., *Automatic modeling of Physical Phenomena: Application to Ultrasonic Data*, J. Appl. Phys., 69 (9), 1991.
2. aiNet – a Neural Network WindowsTM Application, Ver. 1.10, User's Manual, written by I. Peruš & A. Kranjc, June, 1995.
3. Peruš, I., *Razvoj neparametričnih modelov za kategorizacijo poškodovanosti, napovedovanje preostale življenjske dobe armiranobetonskih konstrukcij in za določanje prioritete za sanacijo cestnih mostov*, Letno poročilo za leto 1995, Projekt L2-7071, ZAG Ljubljana, 1996.
4. Žnidarič, J., Terčelj, S. & Marolt, J., *Določitev standardov uporabnosti cestnih mostov: Številčna ocena stanja mostov – rating*, Raziskovalna naloga ZRMK, DN 691/89.
5. Žnidarič, J., Žnidarič, A., Ukrainczyk, V. & Peruš, I., *Določanje varnosti in preostale življenjske dobe obstoječih mostov*, Raziskovalna naloga ZAG Ljubljana (naročnika Ministrstvo za znanost in tehnologijo in Republiška uprava za ceste), zaključno poročilo, 1995.
6. Valenta, O., *From the second RILEM Symposium Durability of Concrete*, Prag, 1970, Materials and Structures, 17, pp. 333-345, 1970.
7. *Proceedings of the 1st International Conference Durability of Building Materials and Components*, ASTM Special Technical Publication 691, Ottawa, Canada, Aug. 21-23, Philadelphia, 1978.
8. *International Conference on Performance of Concrete in Marine Environment*, St. Andrews by the Sea, Canada, ACI Publication SP-65, American Concrete Institute, Detroit, 1980.
9. *Proceedings of the 2nd International Conference Durability of Building Materials and Components*, ASTM Technical Publication, Maryland, USA, Sept. 14-16, 1981.

10. Proceedings of the 3rd International Conference *Durability of Building Materials and Components*, VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland, Aug. 12-15, 1984.
11. *Concrete Durability*, Catherine and Brynt Mather International Conference, ACI SP-100, American Concrete Institute, Detroit, 1987.
12. *Solving Rebar Corrosion Problems in Concrete*, Seminar Reprints, Sept. 27 – 29, Chicago, Illinois, USA, 1982.
13. IABSE Symposium, *Durability of Structures*, Lisabon, Portugal, IABSE Report, Sept. 6 – 8, 1989.
14. *Durable Concrete Structures, CEB Design Guide*, Bulletin d'Information No 182, CH-1015 Lausanne, June 1989.
15. *Diagnosis and Assessment of Concrete Structures*, CEB Bulletin d'Information No 182, State-of-the-Art Report, January, 1989.
16. O'Connor, D. S. & Hyman, W. A., *Bridge Management Systems*, Demonstration Project No. 71, FHWA-DP-71-01R, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, October 1989.
17. Siemes, T. and Vrouwenvelder, T., *Durability – a Probabilistic Approach*, IABSE Proceedings, pp. 65-76, P – 85/85.
18. Sentler, L., *Stochastic Characterization of Carbonation of Concrete*, 3rd International Conference on the Durability of Building Materials and Components, Vol. 3, pp. 581-590, 1984.
19. Grabec, I., *Self-organization of neurons described by the maximum entropy principle*, Biological Cybernetics, Springer-Verlag, pp. 403-409, 1990.
20. Grabec, I. and Sachse, E., *Application of an intelligent signal processing system to acoustic emission analysis*, Journal of Acoustic Society of America, Vol. 85, No. 3, pp. 1226-1235, 1989.
21. Peruš, I., Fajfar, P. & Grabec, I., *Prediction of the seismic capacity of RC structural walls by a non-parametric multidimensional regression*, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 23, pp. 1139-1155, 1994.

KONTROLA VARNOSTI OBSTOJEČIH MOSTOV

Controlling the safety of existing bridges

UDK 624.21 + 69.059

ALEŠ ŽNIDARIČ

POVZETEK

Varnost mostov ocenjujemo z varnostnim indeksom β ali z rating faktorjem RF. Pri analizi igrajo pomembno vlogo dejanski podatki o nosilnosti konstrukcije ter o stalni in prometni obremenitvi objekta. Medtem ko podatke o nosilnosti in stalni obtežbi ugotovimo s pregledi konstrukcije, dobimo najbolj zanesljive podatke o prometnih obremenitvah s pomočjo sistemov za tehtanje vozil med vožnjo (weigh-in-motion, WIM), ki zagotavljajo neprekinjeno zbiranje prometnih informacij. V prispevku so predstavljeni tudi določitev pričakovane maksimalne prometne obtežbe na podlagi WIM meritev, izbira parcialnih varnostnih faktorjev in uporaba posebnih obtežnih shem pri računu rating faktorja RF. Postopek računa varnosti je ilustriran s primeroma.

CONTROLLING THE SAFETY OF EXISTING BRIDGES

SUMMARY

Realistic traffic data is an essential parameter in the safety assessment of existing bridges either by the safety index β or by the rating factor RF. While the resistance and the dead load data are obtained during the detailed inspection of the structure, the weigh-in-motion (WIM) measurements are the most appropriate technique for reliable traffic data acquisition. Selection of the load factors, determination of the maximum expected live load effect and application of the rating loading schemes used in the safety analysis of road bridges are also discussed in the paper. The safety evaluation procedure is illustrated by two examples.

UVOD

Pogosto vprašanje, ki si ga zastavljajo upravljalci poškodovanih mostov, je: »Ali in za koliko je potrebno omejiti prometno obtežbo mostu?« Osnovni podatek o stanju objekta, ki je za vse objekte na slovenskih magistralnih cestah na razpolago, je rating poškodovanosti, t. j. številčna ocena vseh vizualno ocenjenih poškodb, ki so bile ugotovljene med rednimi in glavnimi pregledi objekta. Ker pa rating poškodovanosti ne vsebuje nikakršne informacije o sposobnosti poškodovanega objekta za prevzem

obtežbe, je potrebno pri takšnih objektih poleg upoštevanja zmanjšane trajnosti preveriti tudi njegovo varnost. Šele na podlagi takšne analize lahko upravljavec argumentirano izbira med naslednjimi ukrepi:

- ne storiti nič,
- poiskati dodatne rezerve z uporabo natančnejše analize konstrukcije ali natančnejših, bolj zanesljivih podatkov,
- omejiti obtežbo mostu,
- izvesti sanacijo mostu ali
- izvesti rekonstrukcijo oz. zamenjavo mostu.

Avtor:

Aleš Žnidarič, mag. dipl. inž. gradb., Zavod za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva 12, Ljubljana

RAČUN VARNOSTI

Določanje varnosti obstoječih mostov je eden osnovnih elementov vsakega sistema za upravljanje z mostovi [10]. Varnost konstrukcije oz. kritičnega prereza ocenjujemo z varnostnim indeksom β v normalni ali lognormalni obliki:

$$\beta = \frac{\bar{R} - \bar{S}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad \text{ali} \quad \beta = \frac{\ln \bar{R} / \bar{S}}{\sqrt{V_R^2 + V_S^2}} \quad (1)$$

ali z rating faktorjem RF, ki je izpeljan iz enačbe mejnega stanja prereza:

$$RF = \frac{\Phi \times R_d - \gamma_G \times G_n}{\gamma_Q \times Q_n} \quad (2)$$

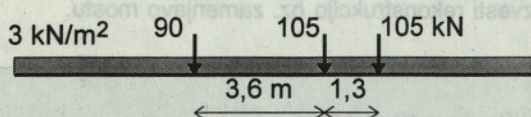
kjer so:

- $\bar{R}$ – srednja vrednost nosilnosti prereza
- $\bar{S}$ – srednja vrednost celotnega vpliva obtežbe v prerezu
- R_d – projektirani vpliv obtežbe po metodi mejnega stanja porušitve
- Φ – koeficient zmanjšanja računske nosilnosti
- G_n, Q_n – računska vpliva stalne in koristne (prometne) obtežbe
- σ_R, σ_S – standardna odklona nosilnosti in vpliva skupne obtežbe
- V_R, V_S – koeficienta variacije nosilnosti in vpliva skupne obtežbe
- γ_G, γ_Q – parcialna varnostna faktorja za stalno in prometno obtežbo.

Medtem ko račun varnostnega indeksa zahteva verjetnostni pristop in se uporablja v bolj ali manj izjemnih primerih, je račun rating faktorja RF determinističen in primeren za kar najširšo uporabo.

Račun realne varnosti temelji na uporabi dejanskih in ne projektiranih vrednosti nosilnosti ter stalne in prometne obtežbe. Nosilnost in stalno obtežbo dovolj natančno določimo na podlagi rezultatov detajlnega pregleda konstrukcije, ki mora biti sestavni del analize močno poškodovanega objekta. Za določitev prometne obtežbe v večini primerov uporabimo posebne obtežne sheme za analizo obstoječih mostov, najbolj natančne podatke o obremenitvah pa dobimo z metodo tehtanja vozil med vožnjo (ang. *weigh-in-motion*, WIM, [9]).

SLS 1



Iz enačb 1 in 2 izhaja, da so tako standardna odklona σ_R , σ_S in koeficienta variacije V_R in V_S kot tudi varnostna faktorja γ_G in γ_Q odvisni od zanesljivosti uporabljenih podatkov. Bolj zanesljive podatke uporabimo, višje vrednosti izračunanega varnostnega indeksa oz. rating faktorja β lahko dokažemo. V splošnem velja, da je varnost objekta dovolj velika, ko je večja ali enaka 3,5, če ocenjujemo varnost za normalno življenjsko dobo, oz. večja od 2,5, če upoštevamo skrajšano življenjsko dobo (npr. do naslednjega pregleda ali do predvidene sanacije mostu). Vrednost RF mora vedno presegati 0,95.

Določitev prometne obtežbe

Vpliv prometne obtežbe upoštevamo v računu varnosti bodisi z obtežnimi shemami bodisi z računskim modelom, ki temelji na rezultatih tehtanja težkih tovornih vozil na odseku, na katerem se obravnavani objekt nahaja.

Obtežne sheme za določanje varnosti

Vpliv prometne obtežbe najbolj enostavno iz vrednotimo z uporabo obtežnih shem. Da bi preverili njihovo primerenost za računanje realne varnosti mostov, smo v parametrični študiji [8] preizkusili obtežne sheme za dimenzioniranje PTP-5 in DIN 1072, ki smo jih v Sloveniji uporabljali po letu 1950, ter obtežno shemo LM1 iz Eurocodea 1 [1]. Medtem ko je vpliv prometne obtežbe ob uporabi sheme PTP-5 pri kratkih razpetinah izrazito podcenjen (v shemi niso zastopane dvojne oz. trojne osi, ki so običajne na sodobnih vozilih), sta preostali shemi pretirano konzervativni. Rezultat analize sta predlagani posebni obtežni shemi, ki temeljita na rezultatih WIM meritev in zato ustrezno predstavljata realni promet na slovenskih cestah (slika 1).

Računski model prometne obtežbe

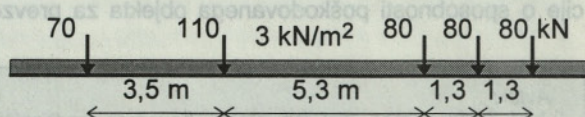
Mnogo bolj zanesljivo sliko o prometnih obremenitvah na obravnavanem mostu dobimo s statistično obdelavo rezultatov tehtanja vozil med vožnjo čez objekt. V tem primeru zapišemo statično količino v prerezu zaradi vpliva prometne obtežbe, Q , v obliki [5, 9]:

$$Q = a \times W_{95} \times H \times m \times K_d \times g \quad (3)$$

kjer je:

- a – deterministična vrednost, s katero se obtežba referenčnega vozila pretvori v statično količino
- W_{95} – karakteristična teža izmerjenih vozil, ki je definirana kot 95 % verjetnost izmerjenih tež
- H – mnogokratnik karakteristične teže W_{95} , s katerim se upošteva istočasno prisotnost več vozil na konstrukciji

SLS 2



Slika 1: Obtežni shemi v vsakem voznem pasu pri računu varnosti obstoječih mostov

m – razmerje med vplivom normirane obtežbe z referenčnim in naključnim vozilom
 g – koeficient prečnega raznosa obtežbe
 K_d – koeficient sunka

Razen vrednosti a so vsi parametri tega modela naključne spremenljivke s srednjo vrednostjo in standardnim odklonom.

Parcialni varnostni faktorji

Nezanesljivost uporabljenih podatkov pri računu RF upoštevamo s parcialnimi varnostnimi faktorji za stalno in prometno obtežbo, γ_G in γ_Q . Ker pri analizi varnosti uporabljamo dejanske podatke o konstrukciji in prometni obtežbi, je nesmiselno uporabiti varnostne faktorje za dimenzioniranje konstrukcij (npr. $\gamma_G/\gamma_Q = 1,6/1,8$ za armirani beton). V odvisnosti od razpoložljivih podatkov je lahko $\gamma_G = 1,4$ ali celo manj, če temelji na rezultatih detaljnega pregleda konstrukcije in se analiza varnosti izvaja za omejeno življenjsko dobo objekta. Izbira varnostnega faktorja za prometno obtežbo γ_Q je odvisna od razpoložljivih podatkov o prometu, od pričakovane življenjske dobe objekta ali obdobja, za katerega se varnost preverja (npr. do naslednjega pregleda mostu), in od gostote prometa. Algoritem izbire γ_Q je prikazan na sliki 2. Njegova vrednost se giblje v območju med 1,4 in 2,2. Če vrednotimo varnost prednapetih konstrukcij, delimo γ_G in γ_Q z 0,85, kolikor znaša razmerje med parcialnimi varnostnimi koeficienti za armirano-betonske in prednapete konstrukcije.

Izbira koeficienta zmanjšane nosilnosti prereza Φ

Slika 3 prikazuje postopek izbire koeficienta zmanjšane nosilnosti prereza Φ v odvisnosti od [8]:

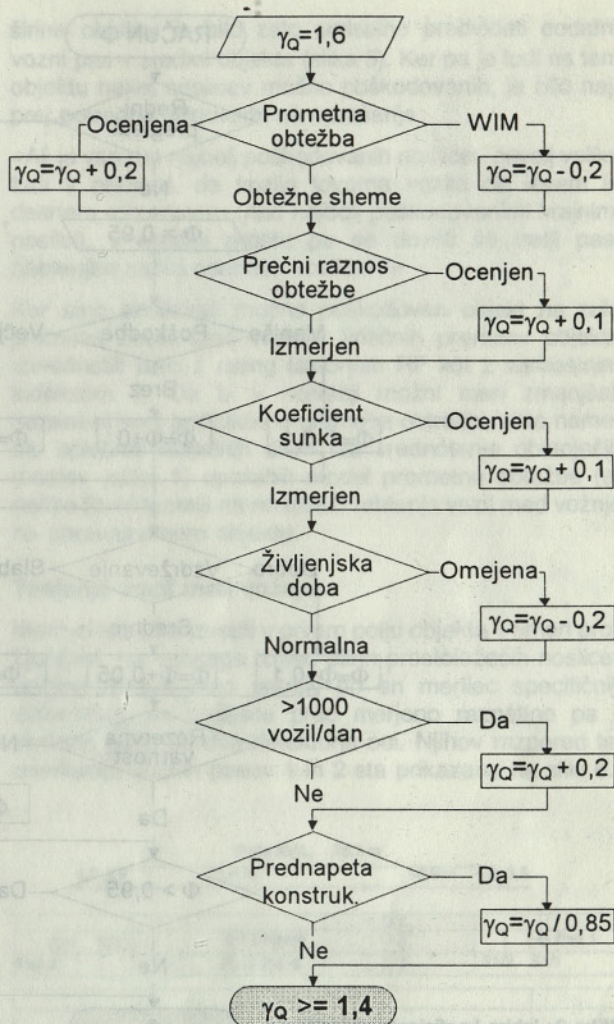
- poškodovanosti objekta; vhodni podatek je poškodbeni indeks α_R , ki je funkcija ratinga poškodovanosti,
- obremenjenosti cestnega odseka in možnosti nastopa izrednih dogodkov (ciljni varnostni indeks β_C),
- zanesljivosti določitve nosilnosti objekta (koeficient variacije V_R),
- statične zasnove in s tem povezane rezervne nosilnosti objekta (ali je objekt v primeru hude poškodbe nekega nosilnega elementa sposoben prerazporediti obtežbo) in
- načina kontrole in vzdrževanja objekta.

Če ne izvedemo detaljnega pregleda konstrukcije in ne uporabimo dovolj natančne analize obravnavanega mostu, je lahko vrednost Φ največ 0,95 in je torej v računu varnosti upoštevana nosilnost manjša od računskega vpliva obtežbe. Z zanesljivimi podatki o konstrukciji pa lahko upoštevamo tudi vrednosti Φ , ki so večje od 1.

RAČUNSKA PRIMERA

Armiranobetonska konstrukcija

V letu 1995 smo po naročilu Direkcije Republike Slovenije za ceste izvedli analizo varnosti mostu čez Limarico v Trenti. Ker zaradi močnega zamakanja beton že vrsto let razpada, armatura pa je močno korodirana, so bili kot

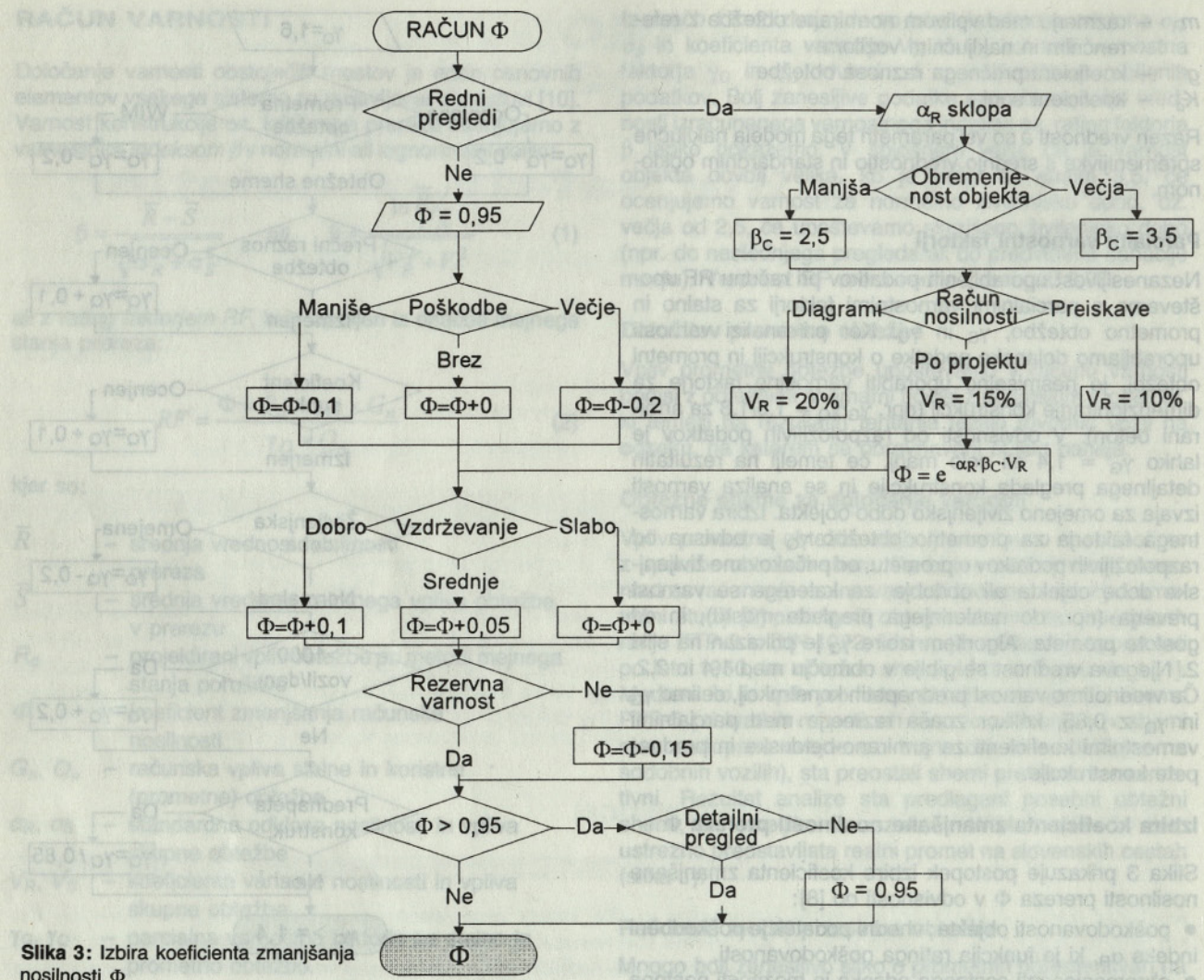


Slika 2: Izbira varnostnega faktorja γ_Q

rezultat rednih in glavnih pregledov mostu po pričakovanju dobljeni razmeroma visoki ratingi poškodovanosti, na podlagi katerih je bila predlagana omejitev obtežbe na 5 ton. Objekt je bil zgrajen leta 1958, načrti pa niso dosegli.

Most je prostoležeča armiranobetonska konstrukcija prek 1 polja, sestavljena iz 4 nosilcev razpetine 9,42 m, ki so povezani s prečnikom, in ploščo. Višina prekladne konstrukcije se spreminja glede na vzdolžni naklon cestišča. Med ploščo, za katero smo z vrtino ugotovili, da je debela najmanj 40 cm, in asfaltom se nahaja neenakomerna plast podložnega materiala debeline 38 do 94 cm. Prečni prezek konstrukcije v sredini razpetine je prikazan na sliki 4.

S stališča trajnosti je objekt v zelo slabem stanju. Opazno je močno zamakanje vseh nosilcev in spodnje strani plošče. Na več mestih na nosilcih je odpadel zaščitni sloj betona in so palice glavne in stremenske armature odkrite. Detaljni pregled objekta je pokazal, da je površina prereza glavne natezne armature zaradi korodiranosti zmanjšana med 5% v nosilcu 1 in 20% v nosilcu 4.



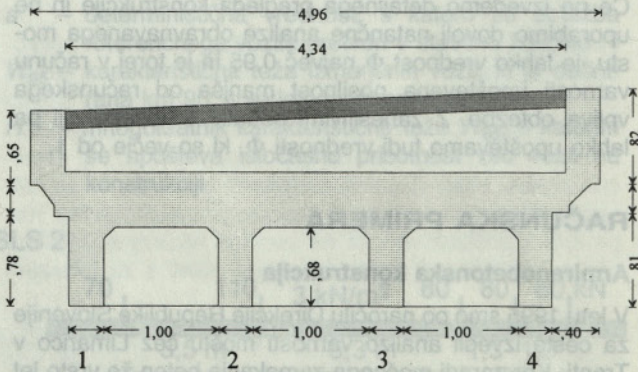
Stremena so bila na nosilcu 1 korodirana površinsko, na nosilcu 4 pa do 40 %. Večje število palic glavne nosilne armature v ploči je bilo odkritih, vendar izguba prereza nikjer ni presegala 5 %.

Za potrebe analize varnosti smo odvzeli vzorce betona in armature. Beton je bil zelo porozen in slabe kakovosti. Zrna agregata so bila slabo zalita in na nekaterih mestih praktično brez veziva. Trdnost valja iz tlačne plošče je znašala 19,9 MPa. Z nateznim preizkusom ugotovljeni meji plastičnosti σ_a dveh armaturnih palic sta znašali 398 in 354 MPa, kar je bilo precej nad pričakovanji.

Račun rating faktorja RF

Analiza je pokazala, da je najbolj kritičen upogibni moment v sredini nosilca št. 4, kjer znašata vrednosti zaradi lastne in prometne obtežbe $M_G = 360$ kNm oz. $M_Q = 207$ kNm. Največji vpliv zaradi prometne obtežbe smo dobili z obtežno shemo SLS1 (slika 1), v kateri smo zaradi ozkega vozišča upoštevali samo 1 vozilo na mostu. Zaradi izmerjenih dimenzij objekta in eksperimentalno določenih

materialnih karakteristik smo izbrali $\gamma_G = 1,2$, v skladu z diagramom iz slike 2 pa $\gamma_Q = 1,6$, ki smo ga dodatno zmanjšali za 0,1 zaradi gorske ceste z izredno redkim tovnim prometom. Faktor zmanjšanja nosilnost Φ po diagramu iz slike 3 je znašal 0,86. Mejni računski upogibni moment nosilca 4, $M_u = 960$ kNm, smo izračunali na



Slika 4: Prečni prezek mostu čez Limarico

podlagi zbranih podatkov o dimenzijah prereza ter količini in kakovosti armature in betona. Koeficient sunka smo izvednotili po Pravilniku o tehničnih normativih za določanje velikosti obtežb mostov [3].

Izračunani rating faktor RF je znašal:

$$RF = \frac{0,86 \times 960 - 360 \times 1,2}{207 \times 1,5 \times 1,32} = 0,96 > 0,95$$

Varnost objekta je bila torej zadovoljiva kljub temu, da je bilo njegovo stanje s stališča trajnosti zaradi močne poškodovanosti kritično in je bilo nujno načrtovati sanacijo ali rekonstrukcijo objekta. Ker pa je zaradi slabega stanja objekta obstajala nevarnost, da se bo varnost konstrukcije v kratkem zmanjša pod dopustno vrednost, smo predlagali, da se v obdobju naslednjih dveh let oz. do sanacije objekta dovoli normalni promet brez omejitve obtežbe, izredne prevoze pa je potrebno dodatno kontrolirati.

Če ne bi izvedli detaljnega pregleda objekta ter preiskav materialnih karakteristik jekla in betona, bi morali upoštevati:

- $\gamma_G/\gamma_Q = 1,4/1,6$ in $\Phi = 0,80$
- mejo plastičnosti jekla največ $\sigma_a = 240$ MPa in kot posledico upogibno računsko nosilnost $M_u = 702$ kNm
- upogibni moment zaradi vozila skupne teže 5 ton, $M_Q = 26,5$ kNm

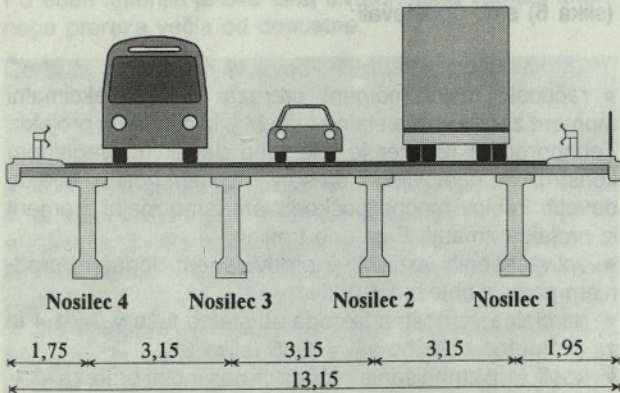
Rating faktor v tem primeru znaša:

$$RF = \frac{0,80 \times 702 - 360 \times 1,4}{26,5 \times 1,6 \times 1,32} = 1,03 \approx 1,0$$

Brez opravljenih preiskav bi bila torej predvidena omejitev obtežbe na 5 ton povsem ustrezna.

Prednapeta konstrukcija

Med sanacijo desnega viadukta Ravbarkomanda (v smeri od Ljubljane proti morju) je na levem viaduktu v smeri proti Ljubljani, ki je prevzel promet v obeh smereh, prihajalo do večjih zastojev prometa. Zaradi zadostne



Slika 5: Prečni prerez in predvidena prometna obremenitev viadukta Ravbarkomanda

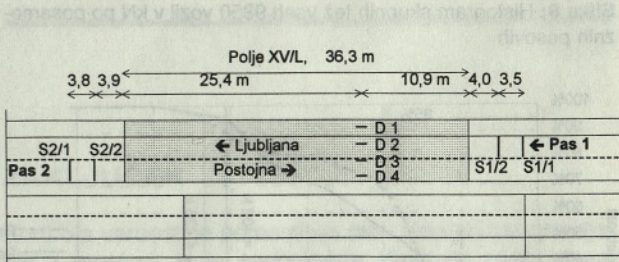
širine objekta je bilo zato smiselno predvideti dodatni vozni pas v sredini objekta (slika 5). Ker pa je tudi na tem objektu nekaj nosilcev močno poškodovanih, je bilo najprej potrebno odgovoriti na vprašanje:

»Ali je varnost najbolj poškodovanih nosilcev dovolj velika tudi v primeru, da vozijo tovorna vozila ob levem in desnem robu mostu (nad najbolj poškodovanimi krajnimi nosilci), v sredini mostu pa se dovoli še tretji pas, namenjen samo osebnim vozilom?«

Ker smo analizirali močno poškodovan objekt na zelo prometni cesti, smo varnost kritičnih prerezov objekta izvednotili tako z rating faktorjem RF kot z varnostnim indeksom β . Da bi v največji možni meri zmanjšali nezanesljivost podatkov o prometni obtežbi, smo namesto splošnih obtežnih shem za vrednotenje obstoječih mostov (slika 1) uporabili model prometne obtežbe (enaka 3), ki temelji na rezultatih tehtanja vozil med vožnjo na obravnavanem objektu.

Tehtanje vozil med vožnjo

Meritve tež smo izvedli v prvem polju objekta v smeri proti Ljubljani. Na vsakega izmed štirih prostoležečih nosilcev dolžine 36,3 m smo pritrdili po en merilec specifičnih deformacij, na cestišče pred merjeno razpetino pa v vsakem pasu po dva detektorja osi. Njihov razpored ter orientacija voznih pasov 1 in 2 sta prikazana na sliki 6.



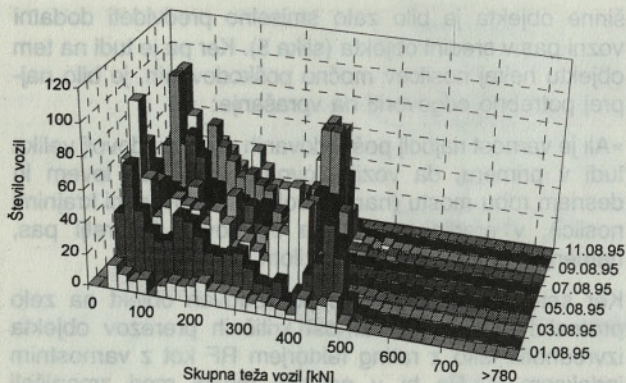
Slika 6: Situacija WIM postavitve na viaduktu Ravbarkomanda

Na slikah 7 in 8 so rezultati meritev skupnih tež tovornih vozil po posameznih pasovih prikazani v obliki histogramov. V prvem primeru so vsa vozila združena po posameznih dnevih, v drugem primeru pa po voznih pasovih. Na sliki 9 so podatki iz slike 8 podani še v kumulativni obliki. Iz njih smo pri 95 % verjetnosti odčitali karakteristične vrednosti izmerjenih tež, ki smo jih uporabili v nadaljnjem računu varnosti.

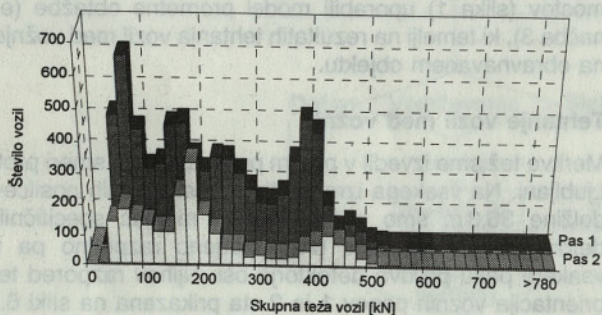
Faktor istočasne prisotnosti vozil na mostu, H , smo določili s pomočjo simulacije maksimalne prometne obtežbe v različnih časovnih obdobjih (slika 10). Ker je v kratkem načrtovana sanacija objekta, smo v nadaljnjem računu uporabili pričakovane vrednosti za obdobje 5 let.

Koeficienta sunka, K_d , in prečnega raznosa, g , smo določili s statistično obdelavo signalov specifičnih deformacij 60 naključnih težkih vozil s 4 do 6 osmi, ki edina lahko tvorijo ekstremno obtežbo.

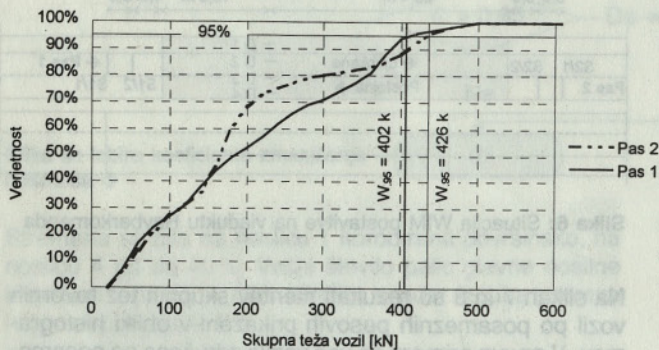
Koeficient m je po definiciji razmerje med notranjima



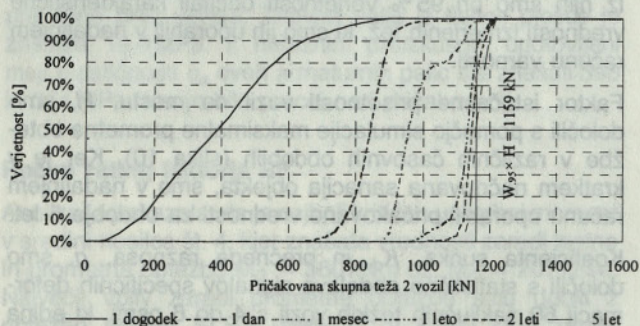
Slika 7: Histogram skupnih tež vozil v kN po posameznih dnevih v pasu 1



Slika 8: Histogram skupnih tež vseh 9850 vozil v kN po posameznih pasovih

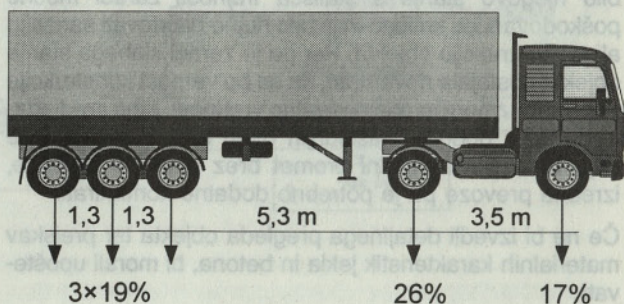


Slika 9: Verjetnost skupnih tež vozil v kN s pripadajočimi karakterističnimi vrednostmi W_{95} v obeh vozniških pasovih



Slika 10: Pričakovana maksimalna teža dveh vozil za različna časovna obdobja

statičnima količinama zaradi normirane obtežbe (teža vozila je 1) z referenčnim vozilom in naključnim vozilom iz populacije, za katero koeficient m računamo. Z njegovo pomočjo ocenimo vpliv razporeda osnih pritiskov na velikost statične količine. Ker lahko tvorita ekstremno pričakovano obremenitev le dve dolgi vozili, smo primerjali normirane momente naključnih vozil in *dolgega referenčnega vozila* [8], t.j. vozila skupne teže 420 kN in z razporedom medosnih razdalj in osnih pritiskov, ki je značilen za slovenske ceste (slika 11).



Slika 11: Razpored osnih pritiskov in medosnih razdalj dolgega referenčnega vozila

Faktor a , ki predstavlja razmerje med statično količino in težo vozila, smo izvednotili za upogibni moment zaradi dveh vozil, katerih medosne razdalje in razpored obtežbe po oseh so enaki kot pri dolgem referenčnem vozilu (slika 11), njuna skupna teža 1.160 kN pa ustreza rezultatu simulacije pričakovane prometne obremenitve za obdobje 5 let, t.j. 1.159 kN (slika 10).

Izvednotene srednje vrednosti s pripadajočimi koeficienti variacije vseh parametrov ter pričakovani maksimalni moment zaradi prometne obtežbe s tovornimi vozili, $M_{Q,T}$, na najbolj obremenjenem nosilcu so zbrani v preglednici 1. Pri tem je skupni koeficient variacije določen kot koren vsote kvadratov koeficientov variacije posameznih parametrov.

Račun varnosti

V računu upogibne varnosti kritičnega prvega nosilca (slika 6) smo upoštevali:

- računski mejni moment prereza M_u in maksimalni moment zaradi vpliva stalne teže M_G , iz glavnega projekta Tehnogradnje [2]; ker je bilo med detajlnim pregledom konstrukcije ugotovljeno, da so v kritičnem nosilcu trije od devetih kablov močno poškodovani, smo mejni moment iz projekta zmanjšali za eno tretjino,
- vpliv osebnih vozil M_o v predvidenem dodatnem srednjem pasu z obtežbo 5,0 kN/m,
- parcialna varnostna faktorja za stalno težo $\gamma_G = 1,4$ in za prometno obtežbo $\gamma_Q = 1,65$ (slika 2),
- koeficient zmanjšanja računske nosilnosti prereza $\Phi = 0,89$ (slika 3).

Parameter	Srednja vrednost	Koeficient variacije V
$W_{95} \times H$	1.159 kN	2,8%
K_d	1,15	8,4%
g	30%	3,6%
m	0,923	8,4%
a	6,33	-
$M_{Q,T}$	2.339 kNm	12,7%

Preglednica 1. Rezultati WIM meritev in pričakovani maksimalni moment zaradi prometne obtežbe, $M_{Q,T}$

Moment	Srednja vrednost	Koeficient variacije V
M_u	14.469 kNm	15,0%
M_G	5.603 kNm	10,0%
$M_Q = M_{Q,T} + M_O$	2.568 kNm	12,7%
M_S	8.171 kNm	16,2%

Preglednica 2. V računu varnosti uporabljeni upogibni momenti

Vsi v računu varnosti upoštevani momenti so zbrani v preglednici 2.

Za upogibno obremenitev prereza smo tako dobili naslednje vrednosti rating faktorja RF in varnostnega indeksa β :

$$RF = \frac{0,89 \times 14.469 - 5.603 \times 1,4}{2.568 \times 1,65} = 1,19 > 0,95$$

$$\beta = \frac{\ln \frac{14.469}{8.171}}{\sqrt{0,15^2 + 0,162^2}} = \frac{0,571}{0,212} = 2,69 > 2,5$$

Po obeh kriterijih je bila torej iz vrednotena varnost kritičnega prereza večja od dopustne.

Če WIM meritev ne bi izvedli, bi morali upoštevati [8]:

- koeficient sunka po projektu,
- predpostavljeni prečni raznos obtežbe,
- računski faktor m za razpetino 32,6 m
- večji parcialni varnostni faktor za prometno obtežbo, $\gamma_Q = 2,1$,
- prometno obremenitev zaradi obtežne sheme SLS, M_{SLS2} , ki je sestavljena iz dveh dolgih referenčnih vozil skupne teže 2×420 kN in enakomerne obtežbe 3 kN/m² na širini 2 m, kolikor odpade na kritični krajni nosilec, M_Q .

Parameter	Srednja vrednost	Koeficient variacije V
M_{SLS2}	5.328,6 kNm	8,0%
K_d	1,11	10,0%
g	30%	5,0%
m	1,04	10,0%
$M_{Q,T}$	1.845 kNm	17,0%
M_q	797 kNm	
M_Q	2.642 kNm	17,0%

Preglednica 3. Upoštevane vrednosti parametrov v primeru, da ne bi izvedli WIM meritev

Iz preglednice 3 je razvidno, da sta izračunana srednja vrednost in koeficient variacije upogibnega momenta zaradi prometne obtežbe večja kot ob upoštevanju rezultatov WIM meritev. Vrednost rating faktorja RF zato znaša le 0,90, varnostnega indeksa β pa 2,25, kar je oboje pod dopustnimi vrednostmi. Če torej ne bi imeli na razpolago rezultatov meritev prometnih karakteristik ter koeficientov sunka in prečnega raznosa obtežbe, zadostne varnosti kritičnega nosilca ob vpeljavi tretjega voznega pasu ne bi mogli dokazati.

ZAKLJUČEK

Kontrola varnosti je pomemben člen sistema za upravljanje z mostovi, ki je nepogrešljiv zlasti pri racionalnem omejevanju obtežbe poškodovanih objektov. Varnost mostov, za katere so bili ugotovljeni visoki ratingi poškodovanosti in so torej s stališča trajnosti problematični, je v velikem številu primerov dovolj velika za normalno ali samo delno omejeno uporabo. Z analizo varnosti lahko upravljavci mostov:

- omilijo hude omejitve prometnih obtežb, ki temeljijo zgolj na podlagi slabega stanja mostu, in s tem občutno zmanjšajo težave in stroške uporabnikov objektov,
- racionalizirajo porabo in razporeditev sredstev, ki so namenjena za vzdrževanje objektov.

Izračunana varnost mostu je močno odvisna od kakovosti uporabljenih podatkov. Medtem ko nezanesljivost podatkov o nosilnosti in stalni obtežbi zmanjšamo s pregledom objekta in preiskavami vgrajenih materialov, zagotovimo najbolj zanesljive informacije o prometnih obremenitvah s tehtanjem vozil med vožnjo.

L I T E R A T U R A

1. Evropski predstandard prENV 1933-3, Eurocode 1 – Basic of Design and Actions on Structures – Part 3: Traffic Loads on Bridges, Bruselj, 1994
2. Glavni projekt viadukta Ravbarkomanda, Tehnogradnje, 1970
3. Pravilnik o tehničnih normativih za določanje velikosti obtežb mostov, Ur. list 1/91, 1991
4. Pravilnik o tehničnih normativih za beton in armirani beton, Uradni list 11/87, 1987
5. Moses F., Verma D.: Load Capacity Evaluation of Existing Bridges, National Co-operative Highway Research Program (NCHRP) Report 301, Washington DC, 1987
6. Žnidarič A., Snyder R. E., Žnidarič J., Moses F.: Bridge Weigh-in-Motion Testing of Vehicle Gross Weights in Slovenia, 1. Evropska WIM konferenca, 323-330, Zürich, 1995
7. Žnidarič J., Žnidarič A.: Evaluation of the Carrying Capacity of Existing Bridges, Slovensko-Ameriški projekt JF 026, Ljubljana, 1994
8. Žnidarič J., Žnidarič A., Ukrainczyk V., Peruš I.: Vrednotenje varnosti in preostale življenjske dobe obstoječih mostov, Raziskovalna naloga ZAG Ljubljana, 1995
9. Žnidarič A.: Meritve prometnih obremenitev z metodo tehtanja vozil med vožnjo (WIM), Gradbeni vestnik št. 3-4, 1996
10. Žnidarič J.: Ugotavljanje ustreznosti obstoječih cestnih mostov v Republiki Sloveniji, Zaključna konferenca OECD/RTRP, Ljubljana, 1995

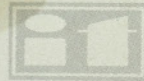
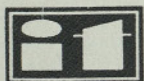


**ZVEZA DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV
IN TEHNIKOV SLOVENIJE,
LJUBLJANA, KARLOVŠKA 3**

**STROKOVNI IZPITI ZA GRADBENIŠTVO IN ARHITEKTURO
TER PRIPRAVLJALNI SEMINARJI ZA STROKOVNE IZPITE V LETU 1996**

A.				B.	
Rok	Leto	Mesec	SEMINAR	IZPIT	
VIII.	1996	November	18.–22. november	pisni	ustni
IX.	1996	December	16.–20. december	19. oktober	4.–8. november
				16. november	2.–6. december

- A. Pripravljalni seminar za strokovne izpite organizira **ZVEZA DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE, LJUBLJANA, KARLOVŠKA 3, telefon (061) 221-587**. Prijavo, v obliki dopisa, pošlje organizatorju plačnik seminarja za prijavljeno osebo. Če je plačnik seminarja podjetje (pravna oseba), priobči v prijavi izjavo, kdo je plačnik. Samoplačnik pošlje organizatorju prijavo v obliki dopisa, skupaj s kopijo dokazila o plačilu seminarja. Cena seminarja za eno osebo znaša 57.960,00 SIT (znesku je že prištet 5% prometni davek). Številka žiro računa je 50101-678-47602. Prijave za seminar v določenem roku je potrebno poslati najmanj 14 dni prej.
- B. Strokovni izpit organizira **GRADBENI INŠTITUT ZRMK, Dimičeva 12, Ljubljana, Gradbeni center (Dimičeva 9), telefon (061) 342-671**. Prijave, v obliki obrazca, z vsemi prilogami, ki so razvidne iz obrazca, sprejema organizator 20 dni pred pisnim delom izpita. Obrazce je mogoče dobiti pri organizatorju, vse informacije pri inž. Jakobu Grošlju od 8.00 do 12.00 ure.



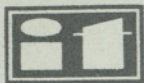
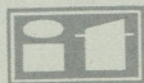
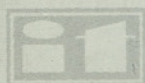
ZVEZA DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE LJUBLJANA, KARLOVŠKA 3

STROKOVNI IZPITI ZA GRADBENIŠTVO IN ARHITEKTURO TER PRIPRAVLJALNI SEMINARJI ZA STROKOVNE IZPITE V LETU 1997

A. SEMINARJI				B. IZPITI	
Rok	Leto	Mesec	SEMINAR	pisni	ustni
IX.	1996	December	16.–20. december	14. december 1996	6.–10. januar 1997
I.	1977	Januar	20.–24. januar	18. januar	3.–7. februar
II.	1997	Februar	17.–21. februar	15. februar	3.–7. marec
III.	1997	Marec	17.–21. marec	22. marec	7.–11. april
IV.	1997	April	18.–18. april	19. april	5.–9. maj
V.	1997	Maj	19.–23. maj	24. maj	9.–13. junij
VI.	1997	September	15.–19. september		
VII.	1997	Oktober	20.–24. oktober	18. oktober	3.–7. november
VIII.	1997	November	10.–14. november	15. november	1.–5. december
IX.	1997	December	15.–19. december		

A. Pripravljalni seminar za strokovne izpite organizira **ZVEZA DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE, 1000 Ljubljana, Karlovška 3** (telefon/fax: 061/221-587. Prijavo, v obliki dopisa, pošlje organizatorju plačnik. Če je plačnik seminarja podjetje (pravna oseba), priobči v prijavi še to izjavo. Samoplačnik pošlje organizatorju poleg prijave še kopijo dokazila o plačilu. Cena seminarja za eno osebo znaša **57.960,00 SIT** (znesku je že prištet 5 % prometni davek). Številka žiro računa je 50101-678-47602.

B. Strokovni izpit organizira **GRADBENI INŠTITUT ZRMK, Dimičeva 12, 1000 Ljubljana**, telefon (061) 301-133. Prijave, v obliki obrazca, z vsemi prilogami, ki so razvidne iz obrazca, sprejema organizator 20 dni pred pisnim delom izpita. Obrazce je mogoče dobiti pri organizatorju, vse informacije pri inž. Jakobu Grošlju od 8.00 do 12.00 ure.





- certificiranje gradbenih proizvodov, materialov in del
- temeljne in aplikativne raziskave
- predkonkurenčni razvoj novih materialov
- nove metode preskušanja
- preskušanje in opazovanje konstrukcij in okolja
- raziskave učinkovite rabe in obnovljivih virov energije
- tehnični preskusi in analize
- kalibriranje meril in preskuševalne opreme

ZAG Ljubljana

Zavod za gradbeništvo Slovenije
Slovenian National Building and Civil Engineering Institute
Dimitčeva 12, 1000 Ljubljana, Slovenija
Tel.: +386 61/188 81 00; Fax: +386 61/188 84 84
El.pošta: info@zag.si; <http://www.zag.si/>