

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Štampfl, A., 2013. Ocena stanja in potresne ogroženosti sakralnih stavb na Slovenskem. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Bosiljkov, V.): 164 str.

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Štampfl, A., 2013. Ocena stanja in potresne ogroženosti sakralnih stavb na Slovenskem. M.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Bosiljkov, V.): 164 pp.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo

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



**MAGISTRSKI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA
KONSTRUKCIJSKA SMER**

Kandidat:

ANTON ŠTAMPFL, univ. dipl. inž. grad.

**OCENA STANJA IN POTRESNE OGROŽENOSTI
SAKRALNIH STAVB NA SLOVENSKEM**

Magistrsko delo štev.: 241

**CONDITION AND SEISMIC RISK
ASSESSMENT OF SACRAL BUILDINGS
IN SLOVENIA**

Master of Science Thesis No.: 241

Mentor:

izr. prof. dr. Vlatko Bosiljkov

Predsednik komisije:

prof. dr. Goran Turk

Člana komisije:

izr. prof. dr. Jana Šelih

prof. dr. Roko Žarnić

Ljubljana, 9. oktober 2013

ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisani Anton Štampfl izjavljam, da sem avtor magistrskega dela z naslovom »Ocena stanja in potresne ogroženosti sakralnih stavb na Slovenskem«.

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

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

Ljubljana, 9. oktober 2013

Anton Štampfl

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	699. 841 (043.2)
Avtor:	Anton Štampfl
Mentor:	Izr. prof. dr. Vlatko Bosiljkov
Naslov:	Ocena stanja in potresne ogroženosti sakralnih stavb na Slovenskem
Obseg in oprema:	164 str., 32 pregl., 73 sl., 68 en.
Ključne besede:	sakralna arhitektura, objekti, kulturna dediščina, potresna ranljivost, potresna ogroženost, zidovina

Izvleček

V magistrskem delu je obravnavana problematika potresne ogroženosti in poškodovanosti sakralnih objektov. Na naboru 64 slovenskih sakralnih objektov je prikazana uporaba različnih enostavnih metod za ocenjevanje potresne ogroženosti sakralnih objektov. Poudarek je na hitrih in enostavnih metodah, ki na osnovi osnovnih podatkov o objektu podajo oceno o potresni ogroženosti, kar služi predvsem za identifikacijo najbolj ogroženih objektov. Uporabljene so metode tujih avtorjev, ki jih nekoliko prilagodimo potrebam naloge. Rezultate različnih metod primerjamo med sabo ter ugotavljamo prednosti in slabosti posameznih metod. V sklopu naloge ugotavljamo tudi morebitno povezavo med ranljivostjo objektov in seizmičnostjo lokacije ter vpliv tlorisne zasnove in umetnostnega sloga na ranljivost objektov. Za ocenjevanje poškodovanosti objektov preverimo dve metodi. Prva je namenjena predvsem ocenjevanju poškodovanosti objektov po potresih, druga pa oceni splošnega stanja objektov. Slednja je bila v osnovi razvita za ocenjevanje stanja mostov, v okviru naloge pa smo jo prilagodili za ocenjevanje sakralnih objektov. Predlagana metoda poleg stopnje poškodovanosti stavbe podaja tudi oceno o potrebnih sanacijskih ukrepih. Podan je predlog sočasne obravnave ocene potresne ogroženosti in ocene stanja poškodovanosti v smislu načrtovanja potrebnih ukrepov.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 699. 841 (043.2)
Author: Anton Štampfl
Supervisor: Assoc. Prof. Vlatko Bosiljkov, Ph.D.
Title: Condition and seismic risk assessment of sacral buildings in Slovenia
Notes: 164 p., 32 tab., 73 fig., 68 eq.
Key words: sacral architecture, buildings, cultural heritage, seismic vulnerability, seismic risk, masonry

Abstract

In the master's thesis the problems of seismic risk and damage of the sacral buildings are discussed. On the sample of 64 Slovenian religious buildings the use of different simple methods for seismic risk assessment of sacral architecture is demonstrated. Emphasis is placed on quick and simple methods, which on the basis of the facility basic data provide seismic risk assessment that serves mainly to identify the most critical buildings. Methods of foreign authors are used, which are adjusted for the purposes of this thesis. The results of different methods are compared and advantages and disadvantages of each method are determined. The possible correlation between the building vulnerability and seismicity of the location as well as the influence of the ground floor plan and architectural style on the building vulnerability is determined within the framework of this thesis. For building damage assessment two methods are examined. The first one is intended foremost for the building damage assessment after the earthquakes and the second for the assessment of the general condition of the buildings. The latter was initially developed for the assessment of the condition of the bridges; however, it was adapted in this thesis for assessing religious facilities. Suggested method provides, in addition to the degree of damage, also the assessment of the necessary rehabilitation measures. A proposal of simultaneous use of the seismic risk assessment and damage assessment is put forward in the sense of planning the necessary measures.

ZAHVALA

*Prihodnost drevesa je nad zemljo,
ker raste navzgor.
Toda korenine ima pod zemljo,
ker se prihodnost hrani iz preteklosti.
Gorje ljudem,
ki ne gojijo spominov na preteklost
in torej ne sejejo v zemljo
marveč v beton
(G. Guareschi)*

Zahvaljujem se mentorju izr. prof. Vlatku Bosiljkovu za usmerjanje in pomoč pri nastajanju magistrskega dela ter dr. Samu Gostiču za pomoč pri obdelavi podatkov. Pokazala sta mi, da je ukvarjanje s kulturno dediščino lahko tudi razburljivo.

Za vso podporo, spodbudo, predvsem pa potrpežljivost se zahvaljujem ženi Petri.

Anton Štampfl

Nabor objektov kot tudi večina podatkov o sakralnih objektih uporabljenih pri izdelavi naloge so pridobljeni v okviru nacionalnega raziskovalnega projekta CRP Mir M4-0207 »Izdelava in demonstracija modela za načrtovanje ohranjanja umetnostnozgodovinske dediščine v vojnih spopadih« (nosilec projekta dr. Barbara Murovec SAZU, nosilci konstrukcijskega dela projekta prof. dr. Roko Žarnić, izr. prof. dr. Vlatko Bosiljkov UL FGG in dr. Samo Gostič GI ZRMK) in nacionalnega raziskovalnega projekta L2—0873 »Optimizirani pristop k načrtovanju ukrepov za ohranjanje objektov zgodovinske in druge stavbne dediščine« (nosilec projekta izr. prof. dr. Vlatko Bosiljkov UL FGG).

KAZALO VSEBINE

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	IV
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	V
ZAHVALA	VI
KAZALO VSEBINE	VII
KAZALO SLIK	X
LIST OF FIGURES.....	XIII
KAZALO PREGLEDNIC.....	XVI
LIST OF TABLES	XVIII
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI.....	XX
1 UVOD	1
1.1 Predstavitev problema	1
1.2 Namen, cilj in delovna hipoteza magistrskega dela.....	2
1.3 Metoda dela	3
2 SLOVAR MANJ ZNANIH BESED IN TUJK.....	4
2.1 Seizmološko izrazje	4
2.2 Izrazje za sakralne zgradbe	5
2.3 Izrazje za kulturno dediščino	9
3 PREGLED OBSTOJEČIH METOD.....	10
3.1 Metode za ocenjevanje potresne ranljivosti in ogroženosti objektov	10
3.1.1 Splošno	10
3.1.2 Empirične metode.....	11
3.1.2.1 Matrike verjetnosti poškodb	11
3.1.2.2 Krivulje ranljivosti.....	13
3.1.2.3 Indeksi ranljivosti	13
3.1.2.3.1 ATC-21	14
3.1.2.3.2 Indeksi ranljivosti, GNDT metoda.....	14
3.1.2.3.3 RISK-UE, makroseizmični model	15
3.1.3 Analitične metode.....	18
3.1.3.1 Enostavne analitične metode	18
3.1.3.1.1 Japonska metoda JREP	18
3.1.3.1.2 Metoda s poenostavljenimi indeksi za cerkve	19
3.1.3.2 Natančnejše analitične metode.....	20
3.1.3.2.1 Metode s krivuljami kapacitete.....	20
3.1.3.2.2 Metode s kinematičnimi mehanizmi.....	21
3.2 Metode za ocenjevanje stanja objektov	22
3.2.1 Splošno	22
3.2.2 Ocenjevanje potresnih poškodb za cerkve.....	23
3.2.3 Ocenjevanje stanja mostov	23
4 POTRESNA OGROŽENOST SLOVENSКИH SAKRALNIH STAVB	24
4.1 Splošno	24
4.2 Nabor objektov za analizo	24
4.3 Potresna nevarnost.....	38
4.4 Izbira metode	40
4.5 Metoda s poenostavljenimi indeksi za cerkve	40
4.5.1 Opis metode.....	40

4.5.2	Modifikacija metode za slovenske razmere	43
4.5.2.1	Potresna obtežba	43
4.5.2.2	Določitev teže celotne konstrukcije	45
4.5.2.3	Delež zidov	46
4.5.2.4	Mehanske karakteristike in strižna nosilnost zidov	47
4.5.2.5	Indeks potresne ogroženosti	54
4.5.3	Analiza in rezultati	54
4.5.3.1	Indeks γ_1	56
4.5.3.2	Indeks γ_2	63
4.5.3.3	Indeks γ_3	68
4.5.3.4	Primerjava z računskimi metodami	73
4.5.3.5	Medsebojna primerjava indeksov	76
4.5.3.6	Vpliv seizmičnosti lokacije	78
4.5.4	Zvoniki	79
4.5.4.1	Splošno	79
4.5.4.2	Poenostavljeni indeksi za zvonike	80
4.5.4.3	Rezultati	88
4.6	Makroseizmična metoda – RISK-UE 1. nivo	94
4.6.1	Opis metode	94
4.6.2	Analiza in rezultati	96
4.7	Makroseizmična metoda RISK-UE 2. nivo	100
4.7.1	Opis metode	100
4.7.2	Analiza in rezultati	107
4.8	Primerjava metod za ocenjevanje potresne ogroženosti	112
4.8.1	Primerjava rezultatov obravnavanih metod	112
4.8.2	Prednosti in slabosti obravnavanih metod	120
4.9	Ocena potresne ogroženosti sakralnih stavb na teritorialnem nivoju	123
5	STANJE SLOVENSКИH SAKRALNIH STAVB	126
5.1	Splošno	126
5.2	Nabor objektov za analizo	135
5.3	Izbira metode	135
5.4	Ocenjevanje potresnih poškodb za cerkve	136
5.4.1	Opis metode	136
5.4.2	Analiza in rezultati	137
5.5	Metoda z ratingi objekta	139
5.5.1	Opis osnovne metode	139
5.5.2	Modifikacija metode za cerkve	140
5.5.2.1	Območja objekta in faktor območja K_o	141
5.5.2.2	Sklopi in podsklopi	142
5.5.2.2.1	Sklop: nosilna konstrukcija (NK)	143
5.5.2.2.2	Sklop: zaščitna konstrukcija (ZK)	143
5.5.2.2.3	Sklop: kulturna dediščina (KD)	143
5.5.2.3	Elementi, poškodbe in faktorji poškodb	144
5.5.2.3.1	Faktor tipa poškodbe B_i	144
5.5.2.3.2	Faktor pomembnosti elementa $K_{1,i}$	146
5.5.2.3.3	Faktor intenzitete poškodbe $K_{2,i}$	147
5.5.2.3.4	Faktor razširjenosti poškodbe $K_{3,i}$	147
5.5.2.3.5	Faktor nujnosti intervencije $K_{4,i}$	148
5.5.2.3.6	Razredi poškodovanosti	148
5.5.3	Analiza in rezultati	149

6	SOČASNA OBRAVNAVA POTRESNE OGROŽENOSTI IN STANJA SAKRALNIH STAVB.....	153
7	ZAKLJUČKI.....	155
8	POVZETEK	158
9	SUMMARY	159
	VIRI.....	160

KAZALO SLIK

Slika 1: Osnovne prostorske enote vzdolžno zasnovane cerkve	8
Slika 2: Shematski prikaz postopka ocenjevanja potresne ogroženosti in vrste metod	11
Slika 3: Shematski prikaz krivulj ranljivosti (HAZUS, 2003: str. 2–10)	13
Slika 4: Indeks poškodovanosti d v odvisnosti od PGA za različne indekse ranljivosti (Cherubini et al., 2000: str. 216).....	15
Slika 5: Krivulje ranljivosti za različne tipe objektov kulturne dediščine (Lagomarsino, 2006: str. 453)	17
Slika 6: Zahteve potresa in krivulja kapacitete v AD formatu (Fajfar, 2000: str. 580)	20
Slika 7: Primer porušnega mehanizma fasade (Augusti et al., 2001: str. 259).....	21
Slika 8: Lokacije obravnavanih cerkva	27
Slika 9: Tlorisi obravnavanih cerkva št. 1–18	28
Slika 10: Tlorisi obravnavanih cerkva št. 19–36	29
Slika 11: Tlorisi obravnavanih cerkva št. 37–54	30
Slika 12: Tlorisi obravnavanih cerkva št. 55–64	31
Slika 13: Fotografije nekaterih cerkva z vzdolžno enoladijsko tlorisno zasnovo.....	32
Slika 14: Fotografije nekaterih cerkva z vzdolžno triladijsko tlorisno zasnovo.....	33
Slika 15: Fotografije nekaterih cerkva z vzdolžno enoladijsko zasnovo in bočnimi kapelami	34
Slika 16: Fotografije nekaterih cerkva z vzdolžno-središčno tlorisno zasnovo.....	35
Slika 17: Fotografije nekaterih cerkva s središčno tlorisno zasnovo.....	36
Slika 18: Fotografije nekaterih kapel in primer krstilnice	37
Slika 19: Karta projektnih pospeškov temeljnih tal Slovenije (ARSO)	38
Slika 20: Mejne vrednosti za indekse γ_1 , γ_2 in γ_3 (Lourenço, Oliveira 2005: str. 457)	42
Slika 21: Struktura zidov nekaterih cerkva identificirana z izvedbo preiskovalnih sond.....	50
Slika 22: Struktura zidov nekaterih cerkva identificirana na neometanih delih podstrešja in zvonikov51	
Slika 23: Struktura zidov nekaterih cerkva identificirana na neometanih fasadah.....	52
Slika 24: Struktura stropov nekaterih cerkva.....	53
Slika 25: Povprečni indeksi γ_1 za različne tipe tlorisne zasnove	59
Slika 26: Povprečni indeksi γ_1 za različne umetnostne sloge	59
Slika 27: Indeksi γ_1 za obe pravokotni smeri.....	62
Slika 28: Povprečni indeksi γ_2 [m^2/MN] za različne tipe tlorisne zasnove.....	64
Slika 29: Povprečni indeksi γ_2 [m^2/MN] za različne umetnostne sloge.....	64
Slika 30: Indeksi γ_2 [m^2/MN] za obe pravokotni smeri	67
Slika 31: Povprečni indeksi γ_3^* za različne tipe tlorisne zasnove	69

Slika 32: Povprečni indeksi γ_3^* za različne umetnostne sloge.....	69
Slika 33: Indeksi γ_3^* za obe pravokotni smeri	72
Slika 34: Primeri računskih modelov cerkva analiziranih s programoma SREMB in 3MURI.....	74
Slika 35: Primerjava koeficientov potresnih odpornosti za vzdolžno (x) smer.....	75
Slika 36: Primerjava koeficientov potresnih odpornosti za prečno (y) smer.....	75
Slika 37: Primerjava indeksov potresne ogroženosti I_R za γ_1 , γ_2 in γ_3	77
Slika 38: Indeksi γ_1 , γ_2 in γ_3^* v odvisnosti od seizmičnosti lokacije a_{gR}	79
Slika 39: Kritični prerezi in efektivne višine zvonikov.....	81
Slika 40: Shema prereza zvonika za določitev upogibne nosilnosti.....	82
Slika 41: Oblika potresnega spektra odziva (SIST EN 1998-1:2005: str. 33).....	85
Slika 42: Računski model zvonika; a) potek potresnih sil, b) določitev pomika d za oceno osnovnega nihajnega časa	86
Slika 43: Primerjava osnovnih nihajnih časov izračunanih s približnimi enačbami in modalno analizo	87
Slika 44: Vpliv seizmičnosti lokacije: a) indeksi γ_3 v odvisnosti od seizmičnosti a_{gR} , b) indeksi γ_3^* v odvisnosti od seizmičnosti a_{gR}	89
Slika 45: Vpliv vitkosti: a) indeksi γ_3 v odvisnosti od vitkosti h_{ef}/L , b) indeksi γ_3^* v odvisnosti od vitkosti h_{ef}/L	89
Slika 46: Vpliv vitkosti in nihajnih časov: a) indeksi γ_3 v odvisnosti od vitkosti h_{ef}/L za generirane zvonike, b) indeksi γ_3 v odvisnosti od osnovnega nihajnega časa T_0 za generirane zvonike	90
Slika 47: Indeksi potresne ogroženosti I_R za zvonike za obe pravokotni smeri	93
Slika 48: Stopnje poškodovanosti za zidane objekte (Grünthal, 1998: str. 15).....	94
Slika 49: Mejni in projektni pospeški za cerkve, RISK-UE, 1. in 2. nivo	111
Slika 50: Analiza indeksov potresne ogroženosti I_R za vse obravnavane metode.....	113
Slika 51: Povprečni mejni pospeški a_{MSN} (kot indeksi potresne odpornosti) za različne tipe tlorisne zasnove.....	116
Slika 52: Povprečni mejni pospeški a_{MSN} (kot indeksi potresne odpornosti) za različne umetnostne sloge	116
Slika 53: Mejni pospeški a_{MSN} (kot indeksi potresne odpornosti) za metode: $\gamma_3(q = 1.5)$, RISK-UE 1. nivo in RISK-UE 2. nivo.....	117
Slika 54: Mejni pospeški a_{MSN} (kot indeksi potresne odpornosti) za metode: $\gamma_3(q = 2.25)$, RISK-UE 1. nivo in RISK-UE 2. nivo.....	118
Slika 55: Mejni pospeški a_{MSN} – primerjava z računskimi metodami	119
Slika 56: Ocena potresne ogroženosti sakralnih objektov z različnimi metodami.....	124
Slika 57: Fotografije nekaterih karakterističnih poškodb za cerkve: odpadanje ometa ali nekonstrukcijskih elementov.....	126
Slika 58: Fotografije nekaterih karakterističnih poškodb za cerkve: razpoke na zidovih.....	127
Slika 59: Fotografije nekaterih karakterističnih poškodb za cerkve: razpoke na kupolah, obokih in	

lokih.....	128
Slika 60: Fotografije nekaterih karakterističnih poškodb za cerkve: razpoke v tlakih.....	129
Slika 61: Fotografije nekaterih karakterističnih poškodb za cerkve: poškodbe na fasadah zaradi neustreznega odvodnjavanja meteorne vode.....	130
Slika 62: Fotografije nekaterih karakterističnih poškodb za cerkve: poškodbe na fasadah zaradi zatekanja vode ob odprtinah.....	131
Slika 63: Fotografije nekaterih karakterističnih poškodb za cerkve: poškodbe v notranjosti zaradi zamakanja.....	132
Slika 64: Fotografije nekaterih karakterističnih poškodb za cerkve: poškodbe zidov zaradi kapilarne vlage.....	133
Slika 65: Fotografije nekaterih karakterističnih poškodb za cerkve: poškodbe streh in ostrešij.....	134
Slika 66: Fotografije nekaterih karakterističnih poškodb za cerkve: vegetacija.....	135
Slika 67: Indeksi poškodovanosti i_d	138
Slika 68: Potek razdelitve objekta.....	141
Slika 69: Primer razdelitve objekta na območja (cerkev Marijinega vnebovzetja, Koper).....	142
Slika 70: Razdelitev območij na sklope in podsklope.....	144
Slika 71: Deleži posameznih razredov poškodovanosti: a) za vse obravnavane cerkve, b) brez cerkev poškodovanih v nedavnih potresih.....	149
Slika 72: Ratingi R za obravnavane objekte in razredi poškodovanosti.....	152
Slika 73: Shema za ocenjevanje potrebnih ukrepov.....	154

LIST OF FIGURES

Figure 1: Basic spatial units for longitudinal designed church	8
Figure 2: Schematic representation of seismic risk assessment procedure and types of methods	11
Figure 3: Schematic representation of fragility curves (HAZUS, 2003: p: 2–10)	13
Figure 4: Damage index d vs. PGA for some vulnerability index values (Cherubini et al., 2000: p. 216)	15
Figure 5: Vulnerability curves for different types of monumental buildings (Lagomarsino, 2006: p. 453)	17
Figure 6: Earthquake demand and capacity curve in AD format (Fajfar, 2000: p. 580)	20
Figure 7: An example of façade collapse mechanism (Augusti et al., 2001: p. 259)	21
Figure 8: Locations of analysed churches	27
Figure 9: Floor plans of analysed churches no. 1–18	28
Figure 10: Floor plans of analysed churches no. 19–36	29
Figure 11: Floor plans of analysed churches no. 37–54	30
Figure 12: Floor plans of analysed churches no. 55–64	31
Figure 13: Photographs of some churches with longitudinal floor plan and single aisle	32
Figure 14: Photographs of some churches with longitudinal floor plan and three aisles	33
Figure 15: Photographs of some churches with longitudinal floor plan, one aisle and side chapels	34
Figure 16: Photographs of some churches with combined longitudinal and central floor plan	35
Figure 17: Photographs of some churches with central floor plan	36
Figure 18: Photographs of some chapels and example of baptistery	37
Figure 19: PGA map for Slovenia (ARSO)	38
Figure 20: Thresholds for indexes γ_1 , γ_2 and γ_3 (Lourenço, Oliveira 2005: p. 457)	42
Figure 21: Structure of walls for some churches identified by structural investigations	50
Figure 22: Structure of walls for some churches identified on unplastered parts of attic and bell towers	51
Figure 23: Structure of walls for some churches identified on unplastered façades	52
Figure 24: Structure of ceilings for some churches	53
Figure 25: Average γ_1 indexes for different floor plan types	59
Figure 26: Average γ_1 indexes for different architectural styles	59
Figure 27: γ_1 indexes for two orthogonal directions	62
Figure 28: Average γ_2 indexes [m^2/MN] for different floor plan types	64
Figure 29: Average γ_2 indexes [m^2/MN] for different architectural styles	64
Figure 30: γ_2 indexes [m^2/MN] for two orthogonal directions	67
Figure 31: Average γ_3^* indexes for different floor plan types	69

Figure 32: Average γ_3^* indexes for different architectural styles	69
Figure 33: γ_3^* indexes for two orthogonal directions.....	72
Figure 34: Examples of structural models for churches analysed with SREMB and 3MURI software.....	74
Figure 35: Comparison of seismic resistance coefficients for longitudinal (x) direction	75
Figure 36: Comparison of seismic resistance coefficients for transverse (y) direction	75
Figure 37: Comparison of seismic risk I_R for γ_1 , γ_2 and γ_3	77
Figure 38: Relationship between indexes γ_1 , γ_2 , γ_3^* and seismicity a_{gR}	79
Figure 39: Critical cross sections and effective heights for bell towers	81
Figure 40: Scheme of bell tower cross section for determination of flexural capacity	82
Figure 41: Shape of response spectra (SIST EN 1998-1:2005: p. 33).....	85
Figure 42: Structural model for bell towers; a) distribution of seismic forces, b) determination of displacement d for estimation of natural period	86
Figure 43: Comparison of fundamental periods of vibrations calculated with approximate equations and modal analysis	87
Figure 44: Influence of seismicity: a) relationship between indexes γ_3 and seismicity a_{gR} ,.....	89
Figure 45: Influence of slenderness: a) relationship between indexes γ_3 and slenderness h_{ef}/L ,.....	89
Figure 46: Influence of slenderness and natural period: a) relationship between indexes γ_3 and slenderness h_{ef}/L for generated bell towers, b) relationship between indexes γ_3 and natural period T_0 for generated bell towers.....	90
Figure 47: Seismic risk indexes I_R for bell towers for both orthogonal directions.....	93
Figure 48: Classification of damage to masonry structures (Grünthal, 1998: p. 15).....	94
Figure 49: Ultimate and design accelerations for churches, RISK-UE, 1 st and 2 nd level	111
Figure 50: Analysis of seismic risk indexes I_R for all applied methods	113
Figure 51: Average ultimate accelerations a_{MSN} (as seismic resistance indexes) for different floor plan types.....	116
Figure 52: Average ultimate accelerations a_{MSN} (as seismic resistance indexes) for different architectural styles.....	116
Figure 53: Ultimate accelerations a_{MSN} (as seismic resistance indexes) for the following methods: .	117
Figure 54: Ultimate accelerations a_{MSN} (as seismic resistance indexes) for the following methods: .	118
Figure 55: Ultimate accelerations a_{MSN} – comparison with numerical methods.....	119
Figure 56: Seismic risk of sacral buildings estimated with different methods.....	124
Figure 57: Photographs of some typical damages to churches: detachment of plaster or nonstructural elements.....	126
Figure 58: Photographs of some typical damages to churches: cracks in walls.....	127
Figure 59: Photographs of some typical damages to churches: cracks in domes, vaults, and arches.	128
Figure 60: Photographs of some typical damages to churches: cracks in floors	129
Figure 61: Photographs of some typical damages to churches: damages to façades due to inadequate	

gutter system	130
Figure 62: Photographs of some typical damages to churches: damages to façades due to leaking of water in the area of openings.....	131
Figure 63: Photographs of some typical damages to churches: damages to interior surfaces due to leaking	132
Figure 64: Photographs of some typical damages to churches: damages to walls due to capillary moisture.....	133
Figure 65: Photographs of some typical damages to churches: damages to roofs and roof trusses	134
Figure 66: Photographs of some typical damages to churches: vegetation.....	135
Figure 67: Damage indexes i_d	138
Figure 68: Division of structure	141
Figure 69: Example of division of the structure into regions (church of Assumption of Mary, Koper)	142
Figure 70: Division of regions into assemblies and subassemblies	144
Figure 71: Distribution of damage classes: a) for all the analysed churches, b) without churches damaged in recent earthquakes	149
Figure 72: Ratings R for analysed structures and damage classes	152
Figure 73: Scheme for estimation of required measures	154

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Oblika matrike verjetnosti poškodb, ki jo je predlagal Whitman (Calvi et al., 2006: str. 78).....	12
Preglednica 2: Nabor objektov za analizo z osnovnimi podatki o objektih.....	25
Preglednica 3: Kategorije pomembnosti objektov v EC8 (SIST EN 1998-1:2005: str. 45).....	39
Preglednica 4: Faktorji pomembnost γ za različne kategorije pomembnosti in pogostosti uporabe (Calvi, Cecchi, 2007: str. 24).....	39
Preglednica 5: Vrednosti parametrov tipa tal, ki opisujejo elastični spekter odziva (SIST EN 1998-1: 2005/A101:2009: str. 6).....	44
Preglednica 6: Priporočene geometrijske zahteve za strižne stene (SIST EN 1998-1: 2005/A101:2009: str. 12).....	47
Preglednica 7: Ravni poznavanja konstrukcije in faktorji zaupanja (SIST EN 1998-3:2005: str. 19) .	49
Preglednica 8: Materialne karakteristike zidovja privzete v analizi	50
Preglednica 9: Podatki za izračun indeksov	54
Preglednica 10: Indeksi γ_1 za obe pravokotni smeri	60
Preglednica 11: Indeksi γ_2 za obe pravokotni smeri	65
Preglednica 12: Indeksi γ_3 za obe pravokotni smeri	70
Preglednica 13: Račun indeksov γ_3 za zvonike	91
Preglednica 14: Osnovni parametri V_0 , Q in modifikacijske vrednosti V_k (Lagomarsino et al., 2004b, str. 7 in Lagomarsino, 2006, str. 454).....	96
Preglednica 15: Račun indeksov za cerkve po metodi RISK-UE, 1. nivo.....	99
Preglednica 16: Določitev vrednosti indikatorjev ranljivosti in vrednosti protipotresnih indikatorjev za posamezen porušni mehanizem (Calvi, Cecchi, 2007: str. 46).....	101
Preglednica 17: Porušni mehanizmi za cerkve (Calvi, Cecchi, 2007).....	102
Preglednica 18: Račun indeksov za cerkve po metodi RISK-UE, 2. nivo.....	109
Preglednica 19: Primerjava indeksov potresne ogroženosti I_R za vse obravnavane metode	113
Preglednica 20: Prednosti in slabosti obravnavanih metod	121
Preglednica 21: Povprečni mejni pospeški a_{MSN}	123
Preglednica 22: Število objektov po območjih potresne nevarnosti in povprečni indeksi potresne ogroženosti I_R	124
Preglednica 23: Stopnja poškodovanosti za cerkve glede na indeks poškodovanosti (Lagomarsino, 1999: str. 12).....	136
Preglednica 24: Seznam območij	141
Preglednica 25: Nabor tipov poškodb s pripadajočimi osnovnimi vrednostmi B_i in posebni kriteriji za določitev intenzitete poškodb $K_{2,i}$ določenih tipov poškodb	145
Preglednica 26: Seznam elementov s pripadajočimi faktorji $K_{1,i}$	146
Preglednica 27: Splošni kriteriji za faktor intenzitete poškodb $K_{2,i}$	147

Preglednica 28: Splošni kriteriji za faktor obsega poškodb $K_{3,i}$	147
Preglednica 29: Splošni kriteriji za faktor nujnosti intervencije $K_{4,i}$	148
Preglednica 30: Razredi poškodovanosti	148
Preglednica 31: Ratingi R za obravnavane objekte	150
Preglednica 32: Modifikatorji V_k v odvisnosti od ratinga objekta R	153

LIST OF TABLES

Table 1: Format of the Damage Probability Matrix proposed by Whitman (Calvi et al., 2006: p. 78)	12
Table 2: List of buildings for the analysis with some basic information	25
Table 3: Importance classes for buildings according to EC8 (SIST EN 1998-1:2005: p. 45)	39
Table 4: Importance factors γ_i for different categories of importance and categories of use (Calvi, Cecchi, 2007: p. 24).....	39
Table 5: Values of the soil type parameters describing the elastic response spectra (SIST EN 1998-1: 2005/A101:2009: p. 6).....	44
Table 6: Recommended geometric requirements for shear walls (SIST EN 1998-1: 2005/A101:2009: p. 12).....	47
Table 7: Knowledge levels of structure and confidence factors (SIST EN 1998-3:2005: p. 19)	49
Table 8: Mechanical parameters for masonry adopted in the analysis	50
Table 9: Data for calculation of indexes	54
Table 10: γ_1 indexes for two orthogonal directions.....	60
Table 11: γ_2 indexes for two orthogonal directions.....	65
Table 12: γ_3 indexes for two orthogonal directions.....	70
Table 13: Calculation of γ_3 indexes for bell towers.....	91
Table 14: Basic parameters V_0 , Q and modifying scores V_k (Lagomarsino et al., 2004b, p. 7 and Lagomarsino, 2006, p. 454).....	96
Table 15: Calculation of indexes for churches according to 1 st level of RISK-UE methodology	99
Table 16: Evaluation of the vulnerability indicators and anti-seismic indicators of each damage mechanism (Calvi, Cecchi, 2007: p. 46)	101
Table 17: Collapse mechanisms for churches (Calvi, Cecchi, 2007).....	102
Table 18: Calculation of indexes for churches according to 2 nd level of RISK-UE methodology	109
Table 19: Comparison of seismic risk indexes I_R for all applied methods	113
Table 20: Advantages and disadvantages of applied methods	121
Table 21: Average ultimate accelerations a_{MSN}	123
Table 22: Number of buildings for different seismic regions and average seismic risk indexes I_R ..	124
Table 23: Definition of structural damage levels for the churches, based on the damage index. (Lagomarsino, 1999: p. 12)	136
Table 24: List of regions	141
Table 25: List of damage types with associated basic values B_i and special criteria for evaluation of the damage intensity $K_{2,i}$ for certain damage types	145
Table 26: List of elements with associated factors $K_{1,i}$	146
Table 27: General criteria for the damage intensity factor $K_{2,i}$	147
Table 28: General criteria for the damage extent factor $K_{3,i}$	147

Table 29: General criteria for the urgency of intervention factor $K_{4,i}$	148
Table 30: Damage classes.....	148
Table 31: Ratings R for analysed structures	150
Table 32: Modification factors V_k depending on condition rating factors R	153

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

BSC	koeficient strižne sile ob vpetju (angl. Base Shear Coefficient)
EC0	Eurocode 0 (SIST EN 1990:2004)
EC1-4	Eurocode 1, del 4 (SIST EN 1991-1-4:2005)
EC6	Eurocode 6 (SIST EN 1996-1-1:2006)
EC8	Eurocode 8, (SIST EN 1998-1:2005)
EC8-3	Eurocode 8, del 3, (SIST EN 1998-3:2005)
FEMA	Federal Emergency Management Agency
PGA	vršni ali maksimalni pospešek temeljnih tal (angl. Peak Ground Acceleration)
SRC	koeficient potresne odpornosti (angl. Seismic Resistance Coefficient)

1 UVOD

1.1 Predstavitev problema

Sakralni objekti so posebna vrsta gradbenih konstrukcij, ki zaradi svojih specifičnih lastnosti zahtevajo posebno obravnavo. V prvi vrsti gre za stare, zgodovinske objekte, ki se v veliki meri razlikujejo od sodobnih objektov. Grajeni so iz različnih materialov različne obdelave in vgradnje, imajo različno arhitekturno in konstrukcijsko zasnovo ter izražajo stanje stroke določenega časa in prostora. Vsak objekt je unikat s svojo lastno zgodovino. Tekom let so bili objekti podvrženi različnim vplivom okolja, vgrajeni materiali so bili podvrženi različnim fizikalnim in kemijskim procesom, mnogokrat pa so bili izvedeni naknadni gradbeni posegi (dozidave, prezidave, rušitve ...), kar je vse potrebno upoštevati pri njihovem vrednotenju varnosti in trajnosti. Po drugi strani pa ti objekti zahtevajo posebno obravnavo zaradi njihovega pomena kot kulturne dediščine, saj je njeno ohranjanje in varovanje v interesu države. Večina starejših sakralnih objektov v Sloveniji je namreč opredeljena kot kulturna dediščina, med njimi pa je nemalo takih, ki so razglašeni za kulturni spomenik lokalnega ali državnega pomena.

Varovanje in ohranjanje kulturne dediščine je v svoji osnovi naloga preventivne narave. Elemente kulturne dediščine je potrebno varovati pred različnimi poškodbami in jih tako ohranjati za nadaljnje rodove. Gre za kompleksno nalogo, ki zahteva sodelovanje strokovnjakov z različnih področij (konservatorstvo, gradbeništvo, arhitektura ...), katerih posamezni interesi si mnogokrat nasprotujejo. Za vsak posamezen primer je tako potrebno poiskati kompromis, ki bo sprejemljiv z vseh vidikov varovanja. Ker sta varstvo in ohranjanje kulturne dediščine nacionalnega pomena, morajo biti obseg, nivo in prioritete varovanja usklajeni na državnem nivoju.

Glede zagotavljanja varnosti kulturne dediščine v smislu nosilnosti konstrukcije je slovenska zakonodaja razmeroma skopa. Zakon o graditvi objektov (2007) navaja: "V objektih, varovanih na podlagi predpisov s področja varstva kulturne dediščine, lahko projektirane ali izvedene rešitve odstopajo od predpisanih bistvenih zahtev, vendar samo pod pogojem, da z odstopanjem ni ogrožena varnost objekta, življenje in zdravje ljudi, promet, sosednji objekti ali okolje." Pravilnik o mehanski odpornosti in stabilnosti objektov (2005), ki standarde Evrokod uvaja v slovensko zakonodajo, se objektov kulturne dediščine dotika v primeru rekonstrukcij: "Za rekonstrukcije objektov se [pravilnik] uporablja, kadar so dane tehnične možnosti za doseg zahtev iz tega pravilnika in če to ne nasprotuje pogojem varstva kulturne dediščine." Tudi sam standard Evrokod v delu, ki se nanaša na oceno in prenovu stavb (EC8-3), navaja, da so pri oceni potresne odpornosti in utrditvah kulturnozgodovinskih objektov pogosto potrebni drugačni pristopi kot pri običajnih stavbah. Očitno je, da zakonodaja predvideva posebno obravnavo kulturnozgodovinskih objektov. Zakon o graditvi objektov tako za kulturnozgodovinske objekte dopušča določene olajšave v smislu odstopanja od izpolnjevanja

bistvenih zahtev, vendar pa pri tem ne smejo biti ogrožena varnost objekta in življenja ljudi. Glede nivoja varnosti v teh primerih zakonodaja ne podaja nikakršnih pojasnil. V tem oziru je problematična predvsem varnost pri potresni obtežbi, saj je kulturnozgodovinski objekt težko zagotoviti enak nivo varnosti, kot je zahtevan za novogradnje. Omejitve predstavljajo predvsem pogoji varstva kulturne dediščine, ki, glede na možno interpretacijo pravilnika, pravzaprav narekujejo maksimalen možen nivo varnosti objekta. Tu bi bilo na nivoju zakonodaje smiselno doreči minimalen nivo (potresne) varnosti za kulturnozgodovinske objekte, ki bi ga bilo potrebno v vsakem primeru zagotoviti.

Predvsem bi bilo potrebno več zavedanja, da je za varovanje in ohranjanje kulturnozgodovinskih, zlasti sakralnih, objektov zagotavljanje varnosti in trajnosti konstrukcije bistvenega pomena, saj je dragocena arhitekturna in umetniška oprema, ki je predmet varovanja, mnogokrat fizično neločljiva od nosilne konstrukcije (npr. freske, štukature, fasade). Da so sakralni objekti potresno zelo ranljivi, kažejo številne poškodbe tovrstnih objektov tako po svetu kot tudi pri nas (zgornje Posočje 1998 in 2004, L'Aquila 2009, Christchurch 2011 ...).

1.2 Namen, cilj in delovna hipoteza magistrskega dela

V našem prostoru zaenkrat ni navodil ali smernic, ki bi sistematično urejale področje potresne ogroženosti in poškodovanosti sakralnih objektov. K sanaciji ali utrditvi sakralnih objektov se tako mnogokrat pristopi prepozno, ko so že prisotne nepopravljive poškodbe.

Sistematičen pristop k navedeni problematiki v splošnem zahteva več nivojev obravnave. Na prvem nivoju je potrebno identificirati potresno ogrožene objekte. Na drugem nivoju se ti objekti podrobneje analizirajo s preiskavami in računskimi analizami. Nadalje se pripravijo možni predlogi ukrepov, ki se računsko preverijo. Sledi izbor in izvedba najprimernejših ukrepov. Pri tem je potrebno predhodno definirati primerne metode za ugotavljanje potresne ogroženosti, metode preiskav, metode računskih analiz ter zahtevane nivoje varnosti.

Glede na širši okvir sistematičnega pristopa k navedeni problematiki se bomo v sklopu naloge osredotočili predvsem na prvi korak, tj. identifikacijo najbolj ogroženih objektov. Glavni namen magistrskega dela je tako osvetliti problematiko potresne ogroženosti in poškodovanosti sakralnih stavb v Sloveniji ter s tem pripomoči k učinkovitejšemu načrtovanju preventivnih ukrepov na teritorialni ravni.

Cilj magistrskega dela je razvoj hitre in enostavne metode, ki bo na podlagi osnovnih vhodnih podatkov, kot so arhitekturni posnetek, posnetek poškodb in seizmičnost lokacije, omogočala identifikacijo najbolj ogroženih sakralnih objektov.

V magistrskem delu bomo preverili veljavnost sledeče delovne hipoteze:

- Na osnovi elementarnih podatkov o konstrukciji, vgrajenih materialih in poškodovanosti je možno podati realno oceno potresne ogroženosti objektov sakralne arhitekture.

Poleg te bomo v sklopu naloge preverjali še naslednje pomožne hipoteze:

- Starodavni stavbarji so pri zasnovi objektov upoštevali kriterije seizmičnosti lokacije.
- Na potresno ranljivost sakralnega objekta je moč sklepati iz njegove tlorisne zasnove.
- Na potresno ranljivost sakralnega objekta je moč sklepati na osnovi njegovega umetnostnega sloga.

1.3 Metoda dela

V sklopu naloge bomo najprej pregledali strokovno literaturo z obravnavanega področja. Poleg strokovne literature, ki obravnava metode za ocenjevanje stanja in potresne ogroženosti objektov, bo za potrebe naloge potrebno preučiti tudi relevantno literaturo s področja umetnostne zgodovine. Pregledu literature sledi izbor najprimernejših obstoječih metod, ki jih bomo po potrebi prilagodili potrebam sakralnih objektov ter nato uporabili na naboru slovenskih sakralnih objektov. Sledi analiza rezultatov z ugotovitvami.

2 SLOVAR MANJ ZNANIH BESED IN TUJK

2.1 Seizmološko izrazje

V nalogi bomo uporabljali nekatere strokovne pojme s področja seizmologije, ki zahtevajo dodatno obrazložitev, saj različni avtorji podajajo različne definicije in jih uporabljajo v različnih pomenih, poleg tega pa se v različnih pomenih uporabljajo tudi pri vsakdanji uporabi. Glede izrazov s področja analize tveganj bomo uporabljali sistem izrazja, ki ga je za potrebe poenotenja izrazja na tem področju leta 1982 definirala Organizacija združenih Narodov UNDRO (United Nations Disaster Relief Organisation) ter v slovenščino prevedel dr. J. Lapajne.

Potresna nevarnost (angl. seismic hazard, earthquake hazard): naravna ali druga ustrezna danost za potres, ki lahko povzroči neugodne učinke; potresna nevarnost je verjetnostni pojem in jo lahko opredelimo z verjetnostjo prekoračitve (Lapajne, 2011).

Potresna ogroženost (angl. seismic risk, earthquake risk): mogoče gospodarske in družbene posledice prihodnjih potresov; potresna ogroženost je verjetnostni pojem in jo lahko opredelimo z verjetnostjo prekoračitve; odvisna je od potresne nevarnosti, potresne ranljivosti in časa izpostavljenosti (Lapajne, 2011).

Potresna ranljivost (angl. seismic vulnerability): pričakovana stopnja izgub (ali poškodb) danega ogroženca ali skupine ogrožencev ob morebitnem potresu (Lapajne, 2011). Potresno ranljivost objekta lahko opišemo kot dovzetnost objekta za poškodbe pri potresu dane jakosti (Calvi, 2006).

Potresna škoda (angl. seismic damage): materialne in nematerialne izgube, ocenjene po potresu (Lapajne, 2011).

Potresni ogroženci (angl. elements at seismic risk): ljudje in druga živa bitja ter materialne, kulturne in druge dobrine (Lapajne, 2011).

Povratna doba (angl. return period): povprečni čas med potresnim gibanjem tal na določenem kraju, pri katerem dana veličina gibanja tal doseže ali preseže izbrano vrednost (Lapajne, 2009).

Projektni pospešek tal (angl. design ground acceleration): predvideni pospešek tal na lokaciji načrtovanega gradbenega objekta, ki se uporablja za potresno odporno projektiranje tega objekta (Lapajne, 2011).

Verjetnost prekoračitve (angl. probability of exceedance): verjetnost, da bo v danem obdobju na danem mestu ali območju prekoračena izbrana vrednost potresne nevarnosti ali potresne ogroženosti ali neke značilne fizikalne ali geofizikalne (lahko tudi statistične) veličine, ki za dane razmere in potrebe sprejemljivo količinsko opredeljuje potres ali verjetnost, da bodo dosežene določene gospodarske in družbene posledice potresa (Lapajne, 2011).

Tveganje (angl. acceptable risk): tista ogroženost, ki jo zavestno sprejmemo kot sprejemljivo

(Lapajne, 1987, cit. po Đurović, Mikoš, 2006).

Đurović in Mikoš (2006) definirata tveganje kot pričakovane izgube (smrtne žrtve, poškodovanci, škoda na premoženju in motnje v ekonomski dejavnosti) zaradi določene nevarnosti in za neko površino ter referenčno obdobje. Na podlagi matematičnih izračunov je tveganje zmnožek nevarnosti, ranljivosti in vrednosti ogroženec. Vrednost ogroženec je stvar subjektivne presoje ali objektivnega ekonomskega vrednotenja. Pri tem je produkt nevarnosti in ranljivosti označen kot specifično tveganje ali ogroženost, produkt ranljivosti in vrednosti ogroženca pa predstavlja škodni potencial.

2.2 Izrazje za sakralne zgradbe

Ker je za sakralne zgradbe značilna lastna terminologija, bomo na kratko pojasnili nekatere strokovne izraze, ki jih bomo uporabljali nalogi. Obrazložitev pojmov je večinoma povzeta po (Koch, 1998), (Debevec, 1999) in Slovarju slovenskega knjižnega jezika (SSKJ, 2005). Nekateri pojmi so grafično prikazani na sliki 1 in na fotografijah objektov (slike 13–18).

Apsida: oltarna niša v zaključku kora. Njena polkrožna oblika izhaja iz rimskih sakralnih in profanih stavb. Od karolinškega obdobja dalje je pred njo dodan korni kvadrat. *Glavna apside* je v srednji ladji z glavnim oltarjem, *stranske apside* so na koncu stranskih in prečnih ladij. Gotika je preoblikovala apside v poligonalni korni zaključek (Koch, 1999).

Božjepotno svetišče: po Zakoniku cerkvenega prava je to cerkev ali drug sveti kraj, kamor zaradi posebne pobožnosti z odobritvijo krajevnega ordinarija romajo številni verniki (Debevec, 1998).

Cerkev: stavba, namenjena za krščansko bogoslužje (SSKJ, 2005). Po cerkvenem pravu je cerkev sveta stavba, določena za bogočastje, v katero imajo verniki pravico prihajati zlasti za javno opravljanje bogoslužja (Debevec, 1999).

Cerkev v osnovni prostorski delitvi sestavljata dva prostora: prostor za vernike – *ladja* in prostor za duhovščino – *prezbiterij*. Poleg teh so lahko prisotne še druge prostorske enote, kot so: *zvonik*, *zakristija*, *kapela*, *kripta*, *krstilnica*, *narteks*, *pevski kor*, *empora* idr.

Glede tlorisne zasnove ločimo cerkve z *vzdolžno zasnovo* in cerkve s *središčno oz. centralno zasnovo*. Cerkve z vzdolžno zasnovo so lahko: *enoladijske*, *dvoladijske*, *triladijske*, *petladijske*,¹ *cerkve s prečno ladjo*, *cerkve z bočnimi kapelami* ali *cerkve z nepravilno zasnovo*. Za cerkve s središčno zasnovo je značilno, da "se širijo enakomerno na vse strani iz arhitektonsko poudarjenega osrednjega prostora z okroglim, eliptičnim, kvadratnim, poligonalnim ali križnim tlorisom" (Koch, 1998, 483). V okviru naloge bomo poleg ustaljenih izrazov uporabljali še nekatere izraze povezane s tlorisno zasnovo, ki se sicer ne uporabljajo v umetnostnozgodovinski stroki. Za vzdolžne cerkve s posamičnimi kapelami ob glavni ali stranskih ladjah bomo uporabljali izraz *cerkve z dodanimi*

¹ Petladijskih cerkva ne najdemo v slovenskem prostoru (Debevec, 1998).

kapelami (če gre za niz kapel, ki nadomešča stransko ladjo, govorimo o cerkvi z bočnimi kapelami). Za cerkve, ki so nastale s spajanjem središčne in vzdolžne zasnove, značilne predvsem za obdobje baroka, bomo uporabljali izraz *vzdolžno-središčna zasnova*.

Glede oblike stropov je prostor cerkve lahko: *obokan*, *pokrit s kupolo* ali *ravnostropan*. Prostor za vernike je lahko *bazilikalni*, kar pomeni, da je glavna ladja višja od ostalih dveh in je s tem omogočena osvetlitev glavne ladje skozi odprtine v njenih bočnih stenah, lahko je *dvoranski*, kar je oznaka za večladijski prostor, kjer so vse ladje enako visoke, ali *dvoranast*, kjer gre za enoladijski, nedeljen prostor.

Po zakoniku cerkvenega prava je glede upravnega vidika cerkev lahko: *župnijska*, *podružna* ali *samostanska*, glede statusnega vidika je lahko: *škofijska*,² *kapiteljska*, *opatijska*, *proštijska* ali *bazilika*, glede ustanovnega vidika pa: *kapiteljska*, *škapulirska*, *špitalska* ali *cehovska* (Debevec, 1998).

Cerkvena ladja: podolgovata prostorska enota v bogoslužni stavbi. Razlikujemo *glavno oz. osrednjo ladjo*, *stranske ladje* in *prečne ladje* (Debevec, 1999).

Empora: z ograjo ali loki ograjen nadstropni prostor v cerkvi (SSKJ, 2005). Empora poveča talno površino, izloči določene skupine ali skupnosti (npr. ženske, dvorne skupnosti, nune, cerkvene korne pevce), ima orgle (največkrat na zahodu) ali le čelno steno. V središčnih cerkvah je nad obhodom, v bazilikah nad stranskima ladjama, v prečnih ladjah ali nad zahodnim vhodom, v dvoranskih cerkvah je postavljena na samostojne opore in je pogosto zgrajena naknadno (Koch, 1998).

Glavna ali osrednja ladja: srednji prostor večladijske vzdolžne stavbe (Koch, 1998).

Kapela: splošna oznaka za majhno samostojno stoječo bogoslužno stavbo ali prostor, namenjen za bogoslužje znotraj nebogoslužnih stavb (npr. *zasebna kapela*, *samostanska kapela*, *semeniška kapela*, *pokopališka kapela*, *bolniška kapela*, *grajska kapela*, *vojaška kapela*, *jetniška kapela*). Tudi oznaka za prostor znotraj bogoslužne stavbe, kjer se odvijajo določena liturgična opravila ali bogoslužje za določeno skupino vernikov (npr. *korna kapela*, *temenska kapela*, *kapela v stranskih ladjah oz. bočna kapela*).

Po Zakoniku cerkvenega prava je to prostor, ki je s škofovim dovoljenjem namenjen za bogočastje kake skupnosti ali skupine vernikov, ki se tam zbirajo, kamor pa s privolitvijo pristojnega predstojnika lahko prihajajo tudi drugi verniki (Debevec, 1998).

Kor: 1. v krščanski cerkvi prostor za zbor in duhovništvo. Od karolinškega obdobja oznaka za podaljšek srednje ladje prek križiščnega kvadrata. Če ga zaključuje apsida, se celota imenuje *prezbiterij* in *apsidalni kor* (*korni sklep*). Kor (prezbiterij) je največkrat za nekaj stopnic dvignjen nad spodaj ležečo kripto in istočasno nad cerkvenim tlakom. Korni zaključki (*korni sklep*) se imenujejo po

² Uporablja se tudi izraz *stolna cerkev*, *stolnica* ali *katedrala*

geometrijskih likih vzhodnih³ zaključkov: krožni korni zaključek (apsidalni kor), ploski korni zaključek in poligonalni korni zaključek (Koch, 1999). 2. dvignjeni del cerkve, namenjen za orgle in pevce (SSKJ, 2005).

V nalogi bomo izraz *kor* uporabljali v pomenu, ki označuje del prezbiterja. Za oznako dvignjenega prostora namenjenega za orgle in pevce pa bomo uporabljali izraz *pevski kor* ali *empora za pevce*.

Kripta: obokan bogoslužni prostor, deloma ali popolnoma pod zemljo. Največkrat se nahaja pod prezbiterijem. Uporabljali so ga za shranjevanje relikvij (Debevec, 1999).

Križišče, križiščni kvadrat: kvadratni ali večkotni prostor v območju križanja srednje in prečne ladje (Koch, 1999). Prostor je običajno pokrit s kupolo.

Krstilnica, baptisterij: prostor, kjer duhovnik deli zakrament svetega krsta. Od četrtega do devetega stoletja je bila krstilnica pogosto samostojno stoječa centralna stavba krožnega oziroma mnogokotnega tlorisa (Debevec, 1999).

Laterna ali svetlobnica: zastekljen ali odprt svetlobni nastavek na vrhu kupole ali strehe (SSKJ, 2005).

Narteks: pokrito preddverje pri bizantinskih, starokrščanskih ali drugih cerkvah (SSKJ, 2005).

Prečna ladja ali transept: prostor v bogoslužni stavbi, ki je pravokoten na glavno ladjo in jo seka tako, da nastane poudarjeno *križišče* (Debevec, 1999). Dela prečne ladje izven križišča imenujemo *krili prečne ladje*. Cerkev ima lahko več prečnih ladij, sama prečna ladja pa je lahko tudi večladijska.

Prezbiterij: v cerkvi prostor za duhovnike ob glavnem oltarju (Koch, 1999).

Sakralen: verski, bogoslužen (SSKJ, 2005).

Sakralna zgradba: zgradba namenjena verskim obredom oziroma bogoslužju. V okviru naloge bomo obravnavali sakralne zgradbe na Slovenskem, kjer večina takšnih zgradb pripada Rimskokatoliški cerkvi. Po terminologiji te inštitucije se za sakralne zgradbe uporablja izraz *bogoslužne stavbe* in se v osnovni klasifikaciji delijo na: *cerkve, kapele* in *božjepotna svetišča* (Debevec, 1999).

Slavolok: lok, ki ločuje srednjo ladjo cerkve od prečne ladje ali kora (Koch, 1998).

Slemenski stolpič, strešni jezdec: vitek stolpič na slemenu strehe, pogosto nad križiščem glavne in prečne ladje (Debevec, 1999).

Stranska ladja: prostor, ki teče vzporedno s srednjo ladjo in je proti njej (lahko tudi proti naslednjim

³ Za vzdolžne bogoslužne stavbe je že od časa zgodnjega krščanstva značilna *vzhodna usmeritev*, kar pomeni usmeritev vzdolžne osi cerkve proti vzhodu, tako da prezbiterij in oltar gledata proti vzhodu, kot simbolu Kristusovega vstajenja. Kljub temu, da ne gre za pravilo, ki bi veljalo za vse cerkve (npr. bazilika sv. Petra v Rimu), se v umetnostnozgodovinskem izrazju pridevniki vzhodni, zahodni, severni, južni navezujejo na to usmeritev.

stranskim ladjam) odprt (Koch, 1998).

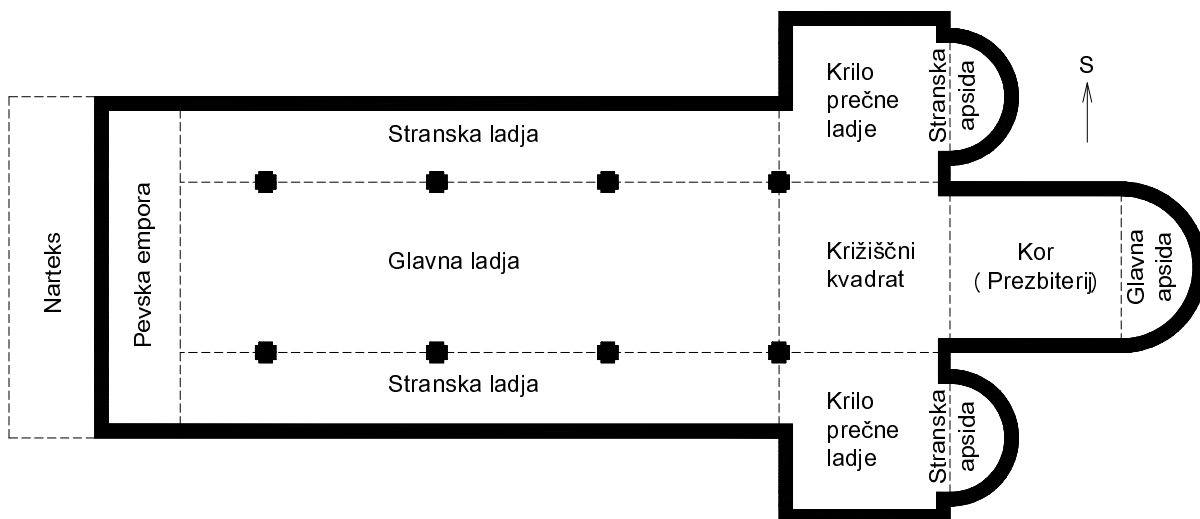
Tambur ali boben: cilindrični ali poligonalni zid, ki podpira kupolo. Lahko je predrt z okni (Architectural terminology, 2013).

Zvonik: stolp z zvonom (SSKJ, 2005). Cerkev ima lahko enega ali več zvonikov, lahko pa je tudi brez zvonika. Glede položaja zvonika v odnosu do bogoslužne stavbe ločimo: *samostojno stoječi zvonik* ali *kampanile*, *zvonik na vhodni fasadi*, *zvonik v osi vhodne fasade*, *zvonik ob stranski fasadi*, *zvonik na stiku ladje in prezbiterija*, *zvonik na križišču glavne in prečne ladje* in *zvonik rastoč iz strehe* (Debevec, 1998). Glede prostorske dimenzije je zvonik lahko zasnovan kot prostorska enota (stolp običajno pravokotne tlorisne oblike) ali pa je zasnovan kot stena. V slednjem primeru se tak zvonik imenuje *preslica* ali *zvonik na preslico*.

Zakristija: prostor, v katerem hranijo liturgično orodje in oblačila, hkrati oblačilnica za duhovnike in ministrante z dostopom v kor (Koch, 1999).

Zvonica: navadno pritlični, obokani prostor pod zvonikom, kjer se zvoni (SSKJ, 2005).

Zvonišče: prostor v zvoniku, kjer visijo zvonovi (SSKJ, 2005).



Slika 1: Osnovne prostorske enote vzdolžno zasnovane cerkve

Figure 1: Basic spatial units for longitudinal designed church

2.3 Izrazje za kulturno dediščino

Kulturna dediščina so viri in dokazi človeške zgodovine in kulture, ne glede na njihov izvor, razvoj in ohranjenost (snovna, materialna dediščina) ter s tem povezane kulturne dobrine (nesnovna, nematerialna dediščina). Zaradi njihove kulturne, znanstvene in splošno človeške vrednosti sta varstvo in ohranjanje kulturne dediščine v državnem interesu (Terminološki slovar, 2013).

Kulturni spomenik je kulturna dediščina s posebnim statusom, ki si ga pridobi na podlagi akta o razglasitvi. Vsebovati mora prvine, s katerimi je dokazana kontinuiteta ali posamezna stopnja kulturnega in civilizacijskega razvoja, ali predstavljati kakovosten dosežek ustvarjalnosti. Glede na vrednotenje se kulturnim spomenikom podeljuje status kulturnega spomenika *lokalnega* ali *državnega pomena*, glede na vsebino se jih razvršča v varstvene skupine (Terminološki slovar, 2013).

Register nepremične kulturne dediščine je uradna, računalniško podprta zbirka podatkov kulturne dediščine na območju Slovenije, ki je v pristojnosti države. Posebna služba Ministrstva za kulturo vpisuje vanj na predlog strokovne službe vso nepremično kulturno dediščino, ne glede na vrsto, tip, obseg, lastništvo ali varstveni status (Terminološki slovar, 2013).

3 PREGLED OBSTOJEČIH METOD

3.1 Metode za ocenjevanje potresne ranljivosti in ogroženosti objektov

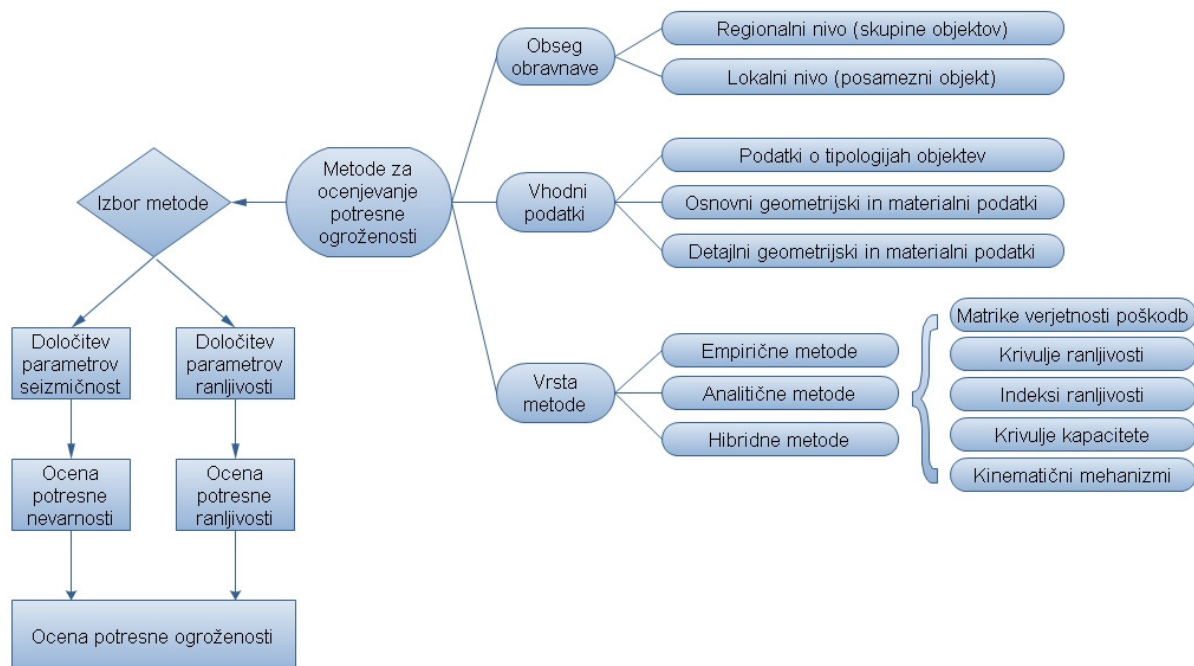
3.1.1 Splošno

Ocenjevanje potresne ranljivosti in ogroženosti objektov je v svetu zelo razvito. Pomembno je za ocenjevanje ekonomskih in drugih izgub pri bodočih potresih, načrtovanje aktivnosti v primeru potresa ali za načrtovanje preventivnih ukrepov za zmanjševanje potresne ogroženosti. Razvite so številne metode, ki se med seboj razlikujejo po zahtevnosti in natančnosti. Izbira ustrezne metode je odvisna od namena, razpoložljivosti kapacitet (tehnologija, sredstva, čas) in razpoložljivosti podatkov o objektih.

Zaradi velikega števila metod je možnih tudi veliko načinov njihovih klasifikacij. Tako se glede načina ocene ranljivosti metode delijo na empirične in analitične. Prve temeljijo na opazovanju poškodb preteklih potresov, druge pa na računski analizi numeričnih ali analitičnih modelov. Metode, ki združujejo oba pristopa, se imenujejo hibridne. Druga možnost je delitev glede obsega obravnave. Tu se metode delijo na metode, ki obravnavajo potresno ranljivost in ogroženost na širšem, regionalnem nivoju, ter na metode, ki obravnavajo posamezne objekte (lokalni nivo). Poleg tega se lahko metode razlikujejo glede zahtevnosti analize, natančnosti vhodnih in izhodnih podatkov, kvalitete rezultatov ipd. Velja, da empirične metode običajno obravnavajo veliko število objektov ob upoštevanju malo parametrov, analitične metode pa malo število objektov z veliko parametri (D'Ayala et al., 2010). Z ožjenjem obsega obravnave se običajno povečuje natančnost in tudi zahtevnost metod. Vrste metod in postopek ocenjevanja potresne ogroženosti prikazuje slika 2.

Potresno ranljivost objekta lahko označimo kot dovzetnost objekta za poškodbe zaradi gibanja tal pri potresu dane jakosti (Calvi et al., 2006). Cilj metod za ocenjevanje potresne ranljivosti je iskanje povezave med gibanjem tal pri potresu (zahteve potresa) in poškodbami objektov. Pri tem so potresne zahteve tradicionalno izražene v obliki makroseizmične intenzitete ali pospeška tal (PGA), novejša metode pa potresno ranljivost povezujejo s spektri odziva. Za opis poškodb se pri empiričnih metodah običajno uporabljajo klasifikacije poškodb makroseizmičnih lestvic (npr. MSK lestvica, modificirana Mercallijeva lestvica, EMS98 lestvica), pri analitičnih metodah pa so poškodbe običajno opredeljene z mejnimi stanji konstrukcij.

V nadaljevanju na kratko predstavimo nekaj značilnih metod za ocenjevanje potresne ranljivosti oziroma ogroženosti in ugotavljamo njihovo primernost za potrebe zastavljene naloge.



Slika 2: Shematski prikaz postopka ocenjevanja potresne ogroženosti in vrste metod

Figure 2: Schematic representation of seismic risk assessment procedure and types of methods

3.1.2 Empirične metode

Prve empirične metode za ocenjevanje potresne ogroženosti so bile razvite 70. letih prejšnjega stoletja. Uporabljajo se predvsem za ocenjevanje potresne ogroženosti na regionalnem nivoju, za hitro identifikacijo najbolj ranljivih objektov, služijo pa lahko tudi za kalibracijo numeričnih modelov. Metode temeljijo predvsem na opazovanju poškodb preteklih potresov in njihovi statistični obdelavi (opazovalne metode) ali pa na ocenjevanju na podlagi izkušenj (t. i. ekspertno mnenje). Na podlagi obdelave podatkov se izdelajo matrike verjetnosti poškodb ali krivulje ranljivosti za skupine objektov (tipologije objektov) s podobnimi lastnostmi. Potresno ogroženost obravnavanega območja se določi glede na pripadnost objektov posameznim tipologijam. K empiričnim metodam prištevamo tudi t. i. metode s točkovanjem (angl. scoring methods), ki temeljijo na hitrem ogledu in točkovanju določenih značilnosti posameznih objektov, na podlagi katerega se ocenjuje njihova ranljivost.

3.1.2.1 Matrike verjetnosti poškodb

Matrike verjetnosti poškodb (angl. Damage Probability Matrix) podajajo v diskretni obliki verjetnosti za doseganje določenih stopenj poškodb pri določenih stopnjah potresa za določene tipologije objektov. Metoda namreč predpostavlja, da imajo posamezne tipologije objektov enako verjetnost za pojav določene stopnje poškodb pri dani potresni obremenitvi. Na podlagi razvrščanja objektov v določene razrede (tipologije) in predpostavljenega potresa je mogoče hitro oceniti potresno ogroženost nekega območja.

Matrike verjetnosti poškodb za napovedovanje poškodb ob potresih je leta 1973 predlagal Whitman (Calvi et al, 2006). Potresna obremenitev je izražena z lestvico intenzitete MSK, poškodbe pa kot razmerje med stroški popravila in stroški novogradnje. Na podlagi podatkov o poškodbah več kot 1600 objektov poškodovanih ob potresu leta 1971 v San Fernandu so bile za posamezne tipe objektov izdelane matrike verjetnosti poškodb. Oblika matrike verjetnosti poškodb za določeno tipologijo objektov je prikazana v preglednici 1, kjer so za različne stopnje intenzitete prikazani deleži obravnavanih objektov (v %), ki ustrezajo določeni stopnji poškodovanosti. Ta oblika matrike je osnova za številne druge metode, ki se razlikujejo glede števila stopenj in opisa poškodb, tipov objektov in glede statistične porazdelitve poškodb.

Preglednica 1: Oblika matrike verjetnosti poškodb, ki jo je predlagal Whitman (Calvi et al., 2006: str. 78)

Table 1: Format of the Damage Probability Matrix proposed by Whitman (Calvi et al., 2006: p. 78)

Stopnja poškodovanosti	Konstruktivske poškodbe	Nekonstruktivske poškodbe	Delež poškodb (%)	Intenziteta potresa				
				V	VI	VII	VIII	IX
0	Brez	Brez	0–0.05	10.4	-	-	-	-
1	Brez	Majhne	0.05–0.3	16.4	0.5	-	-	-
2	Brez	Lokalne	0.3–1.25	40.0	22.5	-	-	-
3	Niso opazne	Razširjene	1.25–3.5	20.0	30.0	2.7	-	-
4	Majhne	Znatne	3.5–4.5	13.2	47.1	92.3	58.8	14.7
5	Znatne	Obsežne	7.5–20	-	0.2	5.0	41.2	83.0
6	Velike	Skoraj popolnoma	20–65	-	-	-	-	2.3
7	Nevarnost porušitve		100	-	-	-	-	-
8	Porušitev		100	-	-	-	-	-

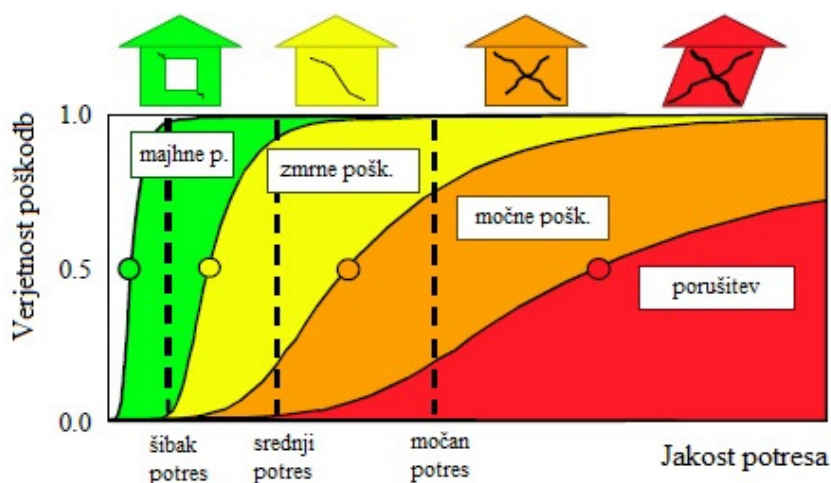
Ena izmed slabosti metod z matrikami verjetnosti poškodb je, da zahtevajo veliko količino statističnih podatkov o poškodbah raznolikih objektov kot posledica različno močnih potresov. Verodostojne in popolne podatke je težko zagotoviti, saj so zelo močni potresi na gosto poseljenih območjih razmeroma redki, karakteristike objektov se med posameznimi regijami in državami zelo razlikujejo, poleg tega pa je spremembe karakteristik objektov (npr. utrditve) težko upoštevati. V ta namen so bile razvite metode, ki namesto na opazovanju poškodb temeljijo na t. i. ekspertni presoji. Te metode temeljijo na oceni skupine strokovnjakov, ki podajo oceno na podlagi svojega znanja in izkušenj. Tak primer je metoda ATC-13, kjer je več kot 50 strokovnjakov s področja potresnega inženirstva podalo oceno o pričakovani stopnji poškodb različnih tipov objektov pri različnih potresnih intenzitetah. Na podlagi statistične obdelave tako dobljenih podatkov so bile narejene matrike verjetnosti poškodb za 78 različnih tipov objektov. Glavna pomanjkljivost te metode je predvsem njena subjektivnost, saj je potresna ranljivost določena izključno na subjektivnem mnenju strokovnjakov (Lang, 2002).

Poleg tega je mogoče matrike verjetnosti poškodb pridobiti neposredno iz makroseizmičnih lestvic, ki že v osnovi podajajo povezavo med stopnjo poškodovanosti različnih tipov konstrukcij in intenziteto potresa (Lagomarsino, Giovinazzi, 2006).

Te metode so primerne predvsem za oceno potresne ogroženosti posamezne tipologije objektov na nekem območju, zato so za potrebe zastavljene naloge, kjer potrebujemo individualno obravnavo posameznih objektov, manj primerne.

3.1.2.2 Krivulje ranljivosti

Matrike verjetnosti poškodb se lahko predstavijo tudi v grafični obliki s t. i. krivuljami ranljivosti⁴ (angl. fragility curves, vulnerability curves). Krivulje v splošnem predstavljajo verjetnost za pojav določene stopnje poškodb oziroma mejnega stanja v odvisnosti od stopnje potresa. Za parameter potresa je lahko upoštevana intenziteta potresa, vršni pospešek temeljnih tal (PGA) ali spektralni pospešek. Krivulje so tradicionalno izdelane na podlagi podatkov preteklih potresov (empirične metode), lahko pa se izdelajo tudi na podlagi računskih analiz (analitične metode). Predstavljajo lahko obnašanje skupine objektov s podobnimi lastnostmi (tipi objektov), posamezen objekt ali le del objekta (makroelement).



Slika 3: Shematski prikaz krivulj ranljivosti (HAZUS, 2003: str: 2–10)

Figure 3: Schematic representation of fragility curves (HAZUS, 2003: p: 2–10)

3.1.2.3 Indeksi ranljivosti

Metode z indeksi ranljivosti temeljijo na hitri in enostavni oceni potresne ranljivosti oziroma ogroženosti. V okviru empiričnih metod gre za t. i. metode s hitrim ogledom (angl. Rapid Screening Methods), kjer se na osnovi vizualnega ogleda oceni in točkuje karakteristike nosilnih elementov in posamezne značilnosti konstrukcije, za katere je znano, da vplivajo na potresno odpornost objekta.

⁴ V strokovni literaturi se izraz *fragility curves* uporablja v povezavi z verjetnostjo prekoračitve določenega mejnega stanja v odvisnosti od stopnje potresa, izraz *vulnerability curves* ali *damage curves* pa s stopnjo poškodovanosti v odvisnosti od stopnje potresa. V okviru naloge za oba pojma uporabljamo izraz *krivulje ranljivosti* (izraz *krivulje krhkosti* se v slovenskem prostoru v tem pomenu ne uporablja).

Končni rezultat je ocena potresne ogroženosti zgradbe, ki je vsota ali skupek delnih ocen (Fajfar et al., 2002). V okviru analitičnih metod v to skupino uvrščamo enostavne računske metode, ki temeljijo na zelo poenostavljenih računskih postopkih. Glavni namen teh metod je hitra identifikacija potresno najbolj ogroženih objektov. Pogosto te metode predstavljajo prvi nivo večnivojskih postopkov, v sklopu katerih se tako identificirani kritični objekti analizirajo na višjih nivojih z natančnejšimi metodami.

3.1.2.3.1 ATC-21

Metoda ATC-21 je bila razvita v Združenih državah pod okriljem agencije FEMA (Federal Emergency Management Agency) leta 1988. Namen metode je hitra identifikacija potresno ogroženih objektov. Temelji na ocenjevanju karakteristik posameznega objekta na podlagi vizualnega ogleda, ki po navedbah dokumentacije traja 15–30 minut, in ne zahteva nobene računske analize konstrukcije. Ocena potresne ogroženosti se določa na osnovi posebnega sistema točkovanja karakteristik konstrukcije in potresne cone. V sklopu ogleda je potrebno identificirati tip nosilne konstrukcije za prevzem horizontalnih sil ter karakteristike konstrukcije, kot so: tlorisna nepravilnost, nepravilnost po višini, mehka etaža, kratki stebri, degradacija materialov, pogoji temeljenja in starost zgradbe. Za različne potresne cone so podane osnovne ocene potresne ogroženosti za 15 tipov konstrukcijskih sistemov ter vrednosti korekcijskih faktorjev, ki zajemajo konstrukcijske posebnosti. Po odštevanju ali prištevanju korekcijskih faktorjev od osnovne ocene, dobimo končno oceno potresne ogroženosti objekta. Vrednosti končne ocene potresne ogroženosti se gibljejo med 0 in 6 – večja kot je vrednost, večja je potresna varnost. Za objekte, ki dosegajo vrednosti nižje od 2, se zahteva natančnejša analiza. Vrednosti osnovnih ocen in korekcijskih faktorjev so določene na podlagi podatkov o poškodbah preteklih potresov in analitičnih podatkov tako, da vrednost končne ocene odraža tudi verjetnost za porušitev oziroma nastanek močnih poškodb (škoda presega 60 % vrednosti zgradbe) pri danem maksimalnem potresu (pri končni oceni potresne ogroženosti vrednosti 3 znaša ocena za verjetnost porušitve $1/10^3$). Opis metode je povzet po (FEMA-154, 2002 in FEMA-155, 1998).

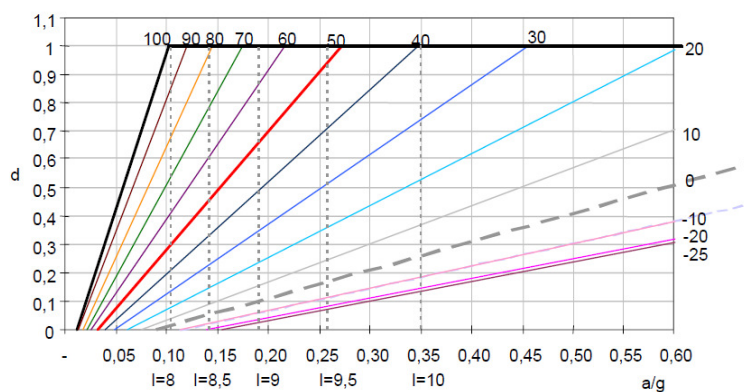
Na idejnem nivoju je metoda primerna za potrebe zastavljene naloge, saj omogoča identifikacijo najbolj ogroženih objektov ob upoštevanju posebnosti posameznih objektov. Za neposredno uporabo na slovenskih cerkvah je metoda manj primerna, saj ne pozna posebnega razreda za cerkve (možno bi jih bilo sicer uvrstiti v razred objektov URM – nearmirano zidovje), poleg tega pa so vsi faktorji izpeljani za ameriški način gradnje objektov in tamkajšnje pogoje seizmičnosti.

3.1.2.3.2 Indeksi ranljivosti, GNDT metoda

Metoda GNDT je italijanska metoda za ocenjevanje potresne ranljivosti objektov na teritorialni ravni. Razvila sta jo avtorja Benedetti in Petrini leta 1984, kasneje pa je bila s strani državnega organa GNDT (Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti) potrjena kot metoda za ugotavljanje potresne

ranljivosti objektov na državnem nivoju (D'Ayala, 2010). Na prvem nivoju gre za metodo z matrikami verjetnosti poškodb, kjer se potresna ranljivost določa na podlagi uvrščanja objektov v določene razrede. Na drugem nivoju pa gre za metodo s hitrim pregledom, v osnovi podobni predhodno opisani metodi ATC-21, le da so tu potrebne tudi določene ekspertne ocene. Metoda temelji na ogledu objekta, v sklopu katerega se zbirajo informacije o parametrih, ki pomembno vplivajo na potresno ranljivost. Ocenjuje se enajst parametrov: tip konstrukcijskega sistema, kvaliteta konstrukcijskega sistema, posplošena potresna odpornost, pogoji temeljenja, horizontalni nosilni sistem, oblika v tlorisu, pravilnost po višini, maksimalna razdalja med zidovi, streha, nekonstrukcijski elementi in stanje ohranjenosti. Vsakemu parametru se pripiše vrednost glede na uvrstitev v enega izmed štirih razredov ranljivosti. Rezultat je t. i. indeks ranljivosti, ki predstavlja vsoto vseh vrednosti parametrov pomnoženih z utežmi, ki izražajo pomembnost posameznega parametra. Normaliziran indeks ranljivosti obsega vrednosti od 0 do 100, pri čemer večja vrednost pomeni večjo ranljivost. Na podlagi primerjave med izračunanimi indeksi ter poškodbami preteklih potresov na več tisoč objektih so bile izdelane krivulje, ki povezujejo pričakovano stopnjo poškodovanosti v odvisnosti od stopnje potresa in indeksa ranljivosti. Opis metode je podan v (Cherubini et al., 2000).

Tudi ta metoda je za potrebe zastavljene naloge primerna predvsem na idejnem nivoju, saj ne obravnava posebnosti sakralnih objektov.



Slika 4: Indeks poškodovanosti d v odvisnosti od PGA za različne indekse ranljivosti (Cherubini et al., 2000: str. 216)

Figure 4: Damage index d vs. PGA for some vulnerability index values (Cherubini et al., 2000: p. 216)

3.1.2.3.3 RISK-UE, makroseizmični model

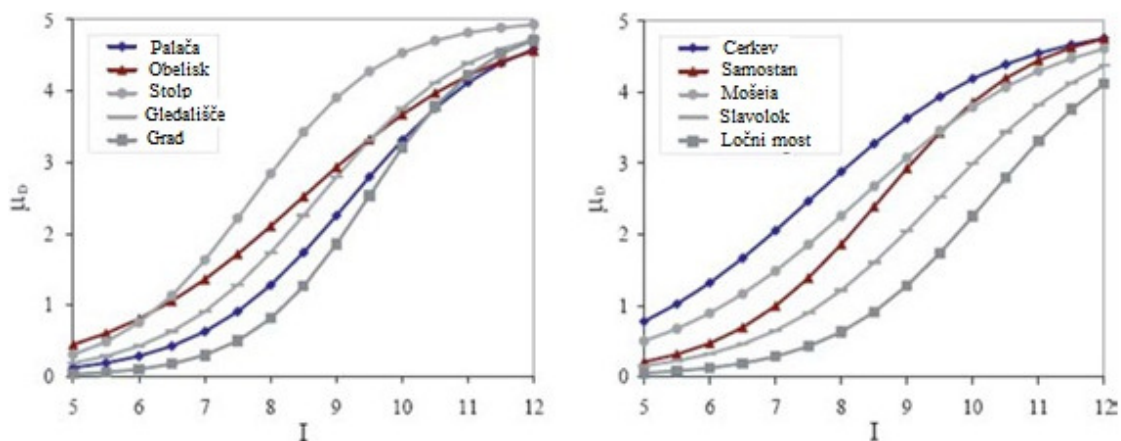
V sklopu projekta RISK-UE (An advanced approach to earthquake risk scenarios with application to different European towns), ki ga je leta 1999 ustanovila Evropska komisija, je bila razvita metodologija za oceno seizmične ranljivosti objektov kulturne dediščine. Opis metodologije je podan v (Lagomarsino 2006 in Lagomarsino, Giovinazzi 2006), primeri uporabe pa v (Irizarry et al., 2004). Metodologija razlikuje dva pristopa: makroseizmični model, kjer je parameter potresa definiran z makroseizmičnimi lestvicami, in mehanični model, ki upošteva karte potresne nevarnosti na osnovi

pospeška temeljnih tal (PGA) oz. spektralnih vrednosti. Pri makroseizmičnem modelu je ranljivost objektov definirana s krivuljami ranljivosti, pri mehničnem modelu pa s krivuljami kapacitete. Oba modela se lahko izvajata na različnih nivojih, odvisno od natančnosti vhodnih podatkov in zahtevane natančnosti rezultatov. Avtorji podajajo tudi analitično povezavo med obema pristopoma, ki omogoča kvantitativno primerjavo med rezultati obeh pristopov. V tem poglavju obravnavamo makroseizmični model, ki se uvršča med empirične metode, mehanski pristop te metodologije pa bo predstavljen v naslednjih poglavjih pri analitičnih metodah.

Makroseizmični pristop temelji na uporabi makroseizmičnih lestvic in krivulj ranljivosti. Te izražajo stopnjo poškodb v odvisnosti od intenzitete potresa. Krivulje za različne razrede objektov so pridobljene na podlagi statistične obdelave podatkov o poškodbah preteklih potresov različnih intenzitet. Krivuljo ranljivosti definirata dva parametra: indeks ranljivosti V in indeks duktilnosti Q , ki ju je potrebno določiti na podlagi podatkov o objektu.

Metodologija predvideva obravnavo objektov na treh nivojih: nivo 0, 1. nivo in 2. nivo, ki se ločijo predvsem po natančnosti podatkov in rezultatov. Predlagano je, da se za pomembne objekte izvede analiza na 1. ali 2. nivoju, za manj pomembne pa se uporabi nivo 0. Te metode služijo predvsem za ocenjevanje potresne ranljivosti oziroma ogroženosti, za potrebe projektiranja sanacijskih in utrditvenih ukrepov pa je potrebno izvesti natančnejše preiskave in analize (3. nivo).

Nivo 0 predstavlja prvo, splošno oceno o potresni ranljivosti objektov kulturne dediščine na teritorialnem nivoju. Ocena je podana na podlagi razvrščanja objektov po tipologiji (npr. cerkev, samostan, palača, vila, stolp ...), brez upoštevanja specifičnih lastnosti posameznih objektov. Za vsak tip objektov sta predpostavljena indeks ranljivosti in indeks duktilnosti, ki definirata krivuljo ranljivosti. Povprečne vrednosti indeksov za posamezne tipe objektov so določene na osnovi podatkov preteklih potresov. Na podlagi razvrstitve objektov je tako mogoče v grobem oceniti stopnjo poškodovanosti objektov obravnavanega območja (mesta, regije) pri različnih potresnih scenarijih.



Slika 5: Krivulje ranljivosti za različne tipe objektov kulturne dediščine (Lagomarsino, 2006: str. 453)

Figure 5: Vulnerability curves for different types of monumental buildings (Lagomarsino, 2006: p. 453)

Na **1. nivoju** se poleg tipologije upoštevajo tudi določene lastnosti posameznih objektov, predvsem tiste, ki vplivajo na potresno ranljivost: pravilnost v tlorisu in po višini, kvaliteta materialov, dimenzije in vitkost elementov, stanje vzdrževanja, posegi v nosilno konstrukcijo – podobno kot pri metodi ATC-21. Te podatke se običajno pridobi s hitrim pregledom objekta. Vsak parameter, ki vpliva na potresno odpornost (parameter ranljivosti), se točkuje po vnaprej pripravljenem točkovniku in vpliva na osnovni (povprečni) indeks ranljivosti predpostavljen za določen tip objektov. Za vsak posamezen objekt se tako določi indeks ranljivosti, kar omogoča primerjavo potresne ranljivosti med posameznimi objekti. Vrednosti parametrov, ki spreminjajo osnovni indeks ranljivosti, so določene na osnovi podatkov preteklih potresov. Predlog parametrov ranljivosti za cerkvene objekte je podan v (Lagomarsino et al. 2004b).

2. nivo predvideva podrobnejšo obravnavo posameznih delov objekta. Opazovanje poškodb preteklih potresov je namreč pokazalo, da pri objektih kulturne dediščine običajno ne prihaja do globalnih porušitvenih mehanizmov, temveč so poškodbe omejene na določeno območje oziroma skupek arhitektonskih elementov – makroelementov, ki se pri potresu obnašajo skoraj neodvisno od drugih delov objekta. Tipični makroelementi na primeru cerkva so: vhodna fasada, ladja, slavolok, kupola, apsida in zvonik. Na tem nivoju se obravnava potresna ranljivost posameznih makroelementov, možna pa je tudi ocena potresne ranljivosti celotnega objekta kot ustrezna kombinacija prispevkov posameznih makroelementov. Metoda temelji na indeksu ranljivosti, ki se ga določi na podlagi detajlnega pregleda objekta in izpolnjevanju ustreznega formularja. Pri tem je potrebno najprej identificirati posamezne makroelemente, nato pa se za vsak makroelement ugotavlja prisotnost indikatorjev ranljivosti (npr. slaba kvaliteta materialov, vitkost elementov, prisotnost razrivajočih elementov ...) in prisotnost protipotresnih indikatorjev (npr. protipotresne vezi, oporni zidovi ...), ki zmanjšujejo ranljivost. Indeks ranljivosti objekta se izračuna kot normirana vsota prispevkov

ranljivosti posameznih makroelementov, pomnoženimi z utežmi glede na njihovo relativno pomembnost. Metoda za aplikacijo na cerkvah je podrobneje opisana v (Lagomarsino et al., 2004a, Calvi, Cecchi, 2007).

Za potrebe naloge sta neposredno uporabna 1. in 2. nivo predstavljene metodologije.

3.1.3 Analitične metode

Številne analitične metode za ocenjevanje potresne odpornosti oz. ranljivosti v grobem razdelimo na: enostavne analitične metode in zahtevnejše analitične metode. Prve so primerne predvsem za hitro oceno potresne odpornosti na večjem številu objektov ter identifikacijo najbolj kritičnih objektov, druge pa so namenjene natančnejši analizi posameznih objektov.

3.1.3.1 Enostavne analitične metode

Enostavne analitične metode temeljijo na zelo enostavnih izračunih in običajno predstavljajo poenostavitve zahtevnejših analitičnih metod. Večinoma temeljijo na hitri oceni potresne odpornosti na podlagi osnovnih parametrov. Primerjava z zahtevami potresa služi kot groba ocena o potresni ogroženosti posameznega objekta. Glede klasifikacije (slika 2) lahko te metode uvrščamo med metode z indeksi ranljivosti.

3.1.3.1.1 Japonska metoda JREP

Primer enostavne analitične metode je japonska metoda za oceno potresne ranljivosti armiranobetonskih konstrukcij, ki je v uporabi že od leta 1975. Gre za tristopenjsko metodo, pri čemer so višji nivoji zahtevnejši in dajejo zanesljivejšo oceno. Na prvem nivoju je potresna odpornost določena na osnovi nosilnosti posameznih etaž, ki jo zagotavljajo vertikalni nosilni elementi. Pri drugem nivoju se pri določitvi nosilnosti posameznih etaž upoštevajo tudi neelastične deformacije vertikalnih nosilnih elementov, pri tretjem nivoju pa se potresna odpornost določa na osnovi nelinearne statične ali dinamične analize celotne konstrukcije. Opis metode smo povzeli po (Otani, 2000, Nakano et al., 2004, Fajfar et al. 2002).

Na prvem nivoju metoda temelji na poenostavljenem izračunu potresne odpornosti posamezne etaže in primerjavi z zahtevami potresa. Potresna odpornost je izražena z indeksom potresne odpornosti I_S , zahteve potresa pa z indeksom I_{S0} . Indeks potresne odpornosti se določi kot produkt treh parametrov, in sicer konstrukcijskega indeksa, indeksa konfiguracije in indeksa starosti konstrukcije. Pri tem konstrukcijski indeks vključuje poenostavljen račun strižne nosilnosti posameznih elementov (produkt predpostavljene strižne trdnosti betona in površine prereza) in predpostavljeno duktilnost elementov, indeks konfiguracije zajema vpliv nepravilnosti (predvsem nepravilnosti v tlorisu in po višini), indeks starosti pa zajema vpliv propadanja materialov (razpoke, deformacije, diferenčni posedki temeljev,

korozija armature, karbonatizacija betona) in se določi na osnovi hitrega pregleda. Indeks zahtev potresa zajema obliko potresnega spektra odziva, vpliv seizmičnosti lokacije, vpliv temeljnih tal in faktor pomembnosti objekta. Če je indeks potresne odpornosti I_S večji ali enak od indeksa zahtev potresa I_{S0} , se predvideva, da ima konstrukcija ustrezno potresno odpornost, če je indeks I_S manjši od $0.65 I_{S0}$, se predvideva, da je potresna odpornost objekta neustrezna – potrebna je utrditev objekta ali porušitev, če pa je indeks I_S v vmesnem območju, se zahteva analiza na višjih nivojih. Vrednosti posameznih parametrov so določene na podlagi opazovanja poškodb preteklih potresov.

Metoda je sicer razvita posebej za armiranobetonske konstrukcije, in tako ni neposredno primerna za uporabo na sakralnih objektih kulturne dediščine, ki so večinoma zidane konstrukcije, je pa osnovni nivo metode konceptualno uporaben.

3.1.3.1.2 Metoda s poenostavljenimi indeksi za cerkve

Enostavno analitično metodo za ugotavljanje potresne ogroženosti zidanih zgodovinskih objektov so predlagali portugalski avtorji (Lourenço, Roque, 2005 in Lourenço, Oliveira 2005). Metoda je namenjena hitri in poceni oceni potresne ogroženosti sakralnih objektov, predvsem na nivoju identifikacije najbolj kritičnih objektov. Temelji na izračunu šestih geometrijskih indeksov, ki se določijo le na podlagi osnovnih geometrijskih podatkov o objektu.

Predstavljeno je šest geometrijskih indeksov, od katerih trije izražajo obnašanje elementov v svoji ravnini, trije pa obnašanje elementov izven svoje ravnine. Prvi indeks (γ_1) izraža razmerje med površino prereza nosilnih zidov in tlorisno površino objekta, drugi indeks (γ_2) izraža razmerje med površino prereza nosilnih zidov in celotno težo objekta, tretji (γ_3) pa izraža razmerje med strižno nosilnostjo in strižno obremenitvijo zidov pri potresni obtežbi – podobno kot pri japonski metodi opisani v prejšnjem poglavju. Za vsakega izmed treh indeksov so predlagane mejne (minimalne) vrednosti, pri čemer so te pri prvih dveh indeksih odvisne od seizmičnosti, pri tretjem indeksu pa je seizmičnost že upoštevana v samem indeksu. Izvenravninski indeksi predstavljajo: vitkost stebrov (γ_4), razmerje med debelino stebrov in višino stebrov (γ_5) ter razmerje med debelino sten in višino sten (γ_6). Mejne vrednosti za te indekse za enkrat še niso podane. Avtorji se zavedajo pomanjkljivosti in omejitev poenostavljene metode in navajajo, da je indekse potrebno razumeti le kot indikatorje možnega obnašanja objektov in ne kot kvantitativno oceno potresne ogroženosti.

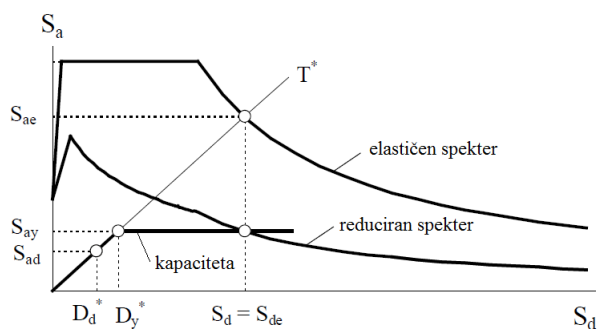
Metoda je neposredno uporabna za potrebe zastavljene naloge.

3.1.3.2 Natančnejše analitične metode

Za računsko analizo obnašanja konstrukcij pri potresu so razvite številne metode. Te se delijo na linearne statične, linearne dinamične, nelinearne statične ter nelinearne dinamične. Linearne metode temeljijo na linearnem odnosu med obtežbo in deformacijami, zato niso sposobne dati zanesljivih informacij o dejanski nosilnosti in duktilnosti konstrukcije. Uporabljajo se predvsem za projektiranje novih konstrukcij, manj pa so uporabne za oceno potresne odpornosti in ranljivosti obstoječih konstrukcij. Nelinearne dinamične metode so najbolj natančne metode, saj zajemajo tako nelinearno obnašanje materialov kot tudi dinamično naravo potresne obtežbe, vendar pa so zaradi velike zahtevnosti neprimerne za vsakdanjo uporabo. Za račun potresne odpornosti obstoječih objektov se tako večinoma uporabljajo nelinearne statične metode (Fajfar et al. 2002). Poleg teh se pri obravnavi objektov kulturne dediščine pogosto uporabljajo tudi metode, ki temeljijo na t. i. kinematičnih mehanizmih. Za identifikacijo najbolj ogroženih objektov, kar je predmet naloge, so natančnejše računske metode manj primerne, saj so časovno in podatkovno prezahtevne. V nadaljevanju opišemo le principe nekaterih najbolj uporabljenih metod.

3.1.3.2.1 Metode s krivuljami kapacitete

Metode s krivuljami kapacitete so nelinearne statične metode in temeljijo na primerjavi kapacitete konstrukcije z zahtevami potresa. Kapaciteto konstrukcije se določi z nelinearno statično t. i. »pushover« analizo, pri kateri se računski model konstrukcije obremenjuje s postopoma naraščajočo vodoravno obtežbo, ki predstavlja potresne sile, in pri tem zasleduje deformacije konstrukcije do porušitve. Dobljeno krivuljo kapacitete, ki izraža odnos med silo in pomikom, se primerja z zahtevami potresa, ki se določijo s pomočjo spektra odziva zapisanega v AD (pospešek-pomik) formatu. Postopek je podrobno opisan v (Fajfar, 2000). Ta metoda je vključena v številne standarde za oceno potresne odpornosti obstoječih stavb in metodologije za ocenjevanje potresne ogroženosti na teritorialnem nivoju. Metoda ima svoje omejitve. Predvsem je manj primerna za obravnavo izrazito neregularnih konstrukcij ter konstrukcij, kjer je za obnašanje pri potresu pomemben vpliv višjih nihajnih oblik.

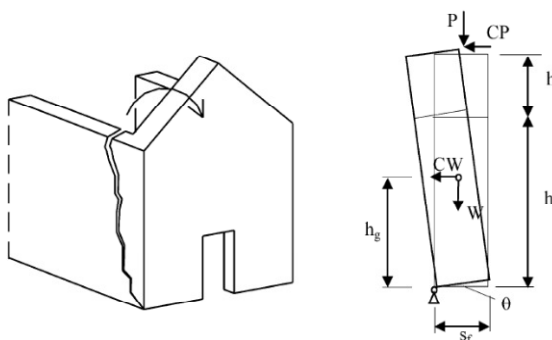


Slika 6: Zahteve potresa in krivulja kapacitete v AD formatu (Fajfar, 2000: str. 580)

Figure 6: Earthquake demand and capacity curve in AD format (Fajfar, 2000: p. 580)

3.1.3.2.2 Metode s kinematičnimi mehanizmi

Pri metodah s kinematičnimi mehanizmi se ugotavlja mejna obtežba, ki stabilno konstrukcijo spremeni v nestabilno, torej obtežba, ki povzroči nastanek kinematičnega oziroma porušnega mehanizma (slika 7). Preverja se več možnih, vnaprej predpostavljenih kinematičnih mehanizmov, pri čemer je merodajen tisti z najmanjšo mejno obtežbo. Pri tem se običajno upoštevajo predpostavke, da so posamezni deli kinematične verige neskončno togi in imajo neskončno tlačno trdnost ter zanemarljivo natezno trdnost. Za določitev mejne obtežbe, ki je običajno izražena z razmerjem glede na vertikalno obtežbo (porušitveni indeks), se uporablja izrek o virtualnem delu.



Slika 7: Primer porušnega mehanizma fasade (Augusti et al., 2001: str. 259)

Figure 7: An example of façade collapse mechanism (Augusti et al., 2001: p. 259)

Na tem principu temeljijo številne metode, ki se razlikujejo glede obsega obravnave (del objekta – makroelement, celoten objekt, skupina objektov), načina izračuna (analitično, numerično), predpostavk računa (npr. vpliv materialnih karakteristik) in namena uporabe.

Metoda VULNUS je bila razvita za oceno ranljivosti zidanih objektov (Bernardini et al., 1990, cit. po Calvi et al, 2006). Temelji na poenostavljenem izračunu dveh porušitvenih indeksov, kjer prvi predstavlja minimalni porušitveni indeks za kinematične mehanizme v ravnini zidov, drugi pa minimalni porušitveni indeks za izvenravninske kinematične mehanizme. Ob upoštevanju izračunanih porušitvenih indeksov ter indeksa ranljivosti, ki se določi s točkovanjem posameznih parametrov ranljivosti, metoda omogoča oceno verjetnosti za določeno mejno stanje poškodb pri določeni potresni obremenitvi.

Metoda FaMIVE (D'Ayala, Speranza, 2003, D'Ayala et. al, 2010) je bila razvita za oceno ranljivosti kulturnozgodovinskih objektov in starih mestnih jeder. Temelji na ugotavljanju najverjetnejšega porušitvenega mehanizma. Obravnava predvsem izvenravninske mehanizme fasad objektov. Na podlagi osnovnih geometrijskih podatkov in robnih pogojev se za vsako fasado določijo možni mehanizmi ter s pomočjo nadomestne statične metode izračuna porušitveni indeks za vsak mehanizem. Pri tem se upoštevajo tudi mehanske karakteristike zidov.

Metoda s kinematičnimi mehanizmi je vključena tudi v metodologijo RISK-UE (Lagomarsino 2006 in Lagomarsino, Giovinazzi 2006). V empirični obliki je zastopana pri makroseizmičnem pristopu na 2. nivoju, kar smo opisali v prejšnjih poglavjih, pri mehanskem pristopu pa je predstavljena kot alternativa poenostavljenim metodam s krivuljami kapacitete, ki opisujejo obnašanje celotnega objekta. Pri kulturnozgodovinskih objektih je poudarek na obnašanju posameznih makroelementov, ki pa so pravzaprav definirani glede na pojav kinematičnih mehanizmov. Avtorji navajajo, da ob pojavu mejne obtežbe (mejnega porušitvenega indeksa) zaradi dinamične narave potresa še ne pride do dejanske porušitve makroelementa oziroma objekta. Zato je mogoče tudi pri metodi s kinematičnimi mehanizmi določiti krivuljo kapacitete, kar omogoča nadaljnjo primerjavo z zahtevami potresa na enak način kot pri metodah s krivuljami kapacitete.

3.2 Metode za ocenjevanje stanja objektov

3.2.1 Splošno

Življenjska doba gradbenih konstrukcij je omejena, saj so vgrajeni materiali podvrženi različnim vplivom, ki povzročajo njihove poškodbe in propadanje. Z ocenjevanjem stanja se ugotavlja dejansko stanje objekta oziroma stopnja poškodovanosti posameznih elementov. Metode se razlikujejo po namenu, obsegu in načinu ocenjevanja. Namen ocenjevanja stanja je lahko ugotavljanje primernosti oziroma varnosti za uporabo (npr. po izrednem dogodku, kot je potres), ocena škode (npr. po potresu ali zaradi vpliva gradnje sosednjih objektov), ocena vrednosti nepremičnine, predvsem pa je poznavanje dejanskega stanja pomembno za načrtovanje preventivnih, sanacijskih in utrditvenih ukrepov. Ocenjevanje lahko obsega objekt kot celoto, lahko pa se osredotoči samo na posamezne sklope (nosilna konstrukcija, ovoj, oprema ...). Po načinu ocenjevanja ločimo med pristopi, ki temeljijo samo na vizualnem pregledu, ter pristopi, ki vključujejo tudi različne preiskave (destruktivne, nedestruktivne, semidestruktivne).

Ocenjevanje stanja objektov je razvito predvsem na področju ocenjevanja poškodb po izrednih dogodkih, kot so potresni in poplave. Ocenjevanje se običajno izvaja na podlagi hitre vizualne ocene in izpolnjevanja obrazcev za evidentiranje poškodb, ki se razlikujejo od države do države. Manj pa je to razvito oziroma sistematizirano na področju ugotavljanja splošnega stanja objektov. To se izvaja na različnih nivojih in v različnem obsegu, odvisno od namena ocenjevanja. Običajno gre za kombinacijo vizualnega pregleda in določenih preiskav, končna ocena pa je v veliki meri odvisna od subjektivne presoje pregledovalca. Izjema so zlasti inženirski objekti, ki zaradi svoje pomembnosti zahtevajo redne preglede in preiskave po točno določenem programu (npr. mostovi, pregrade, daljnovodi ...).

Na kratko bomo opisali dve metodi za ocenjevanje poškodb. Prva je namenjena oceni poškodb po potresih, druga pa oceni stanja mostov.

3.2.2 Ocenjevanje potresnih poškodb za cerkve

Gre za italijansko metodo za ocenjevanje poškodb po potresih posebej prilagojene za cerkve. Predstavlja izhodišče metode za ocenjevanje ranljivosti cerkva, opisane v poglavju 3.1.2.3.3 (RISK-UE, 2. nivo). Temelji na razdelitvi cerkve na makroelemente in opazovanju in vrednotenju aktiviranja posameznih porušnih mehanizmov. Predpostavljeno je 28 možnih porušnih mehanizmov, enakih kot pri ocenjevanju ranljivosti. Vsakemu mehanizmu se pripiše stopnjo poškodovanosti od 0 do 5, pri čemer 0 pomeni, da mehanizem ni vzpostavljen, 5 pa pomeni porušitev. Stopnjo poškodovanosti posameznega makroelementa se določi glede na stopnje podane v makroseizmičnih lestvicah MSK ali EMS98. Indeks poškodovanosti objekta se izračuna kot normirana vsota prispevkov poškodovanosti posameznih makroelementov, pomnoženih z utežmi glede na njihovo relativno pomembnost. Metoda je podrobneje opisana v (Lagomarsino et al. 2004a in Calvi, Cecchi, 2007).

Metoda je neposredno uporabna za potrebe zastavljene naloge.

3.2.3 Ocenjevanje stanja mostov

Prvotno je bila metoda razvita za ocenjevanja stanja avtocestnih mostov (Žnidarič, J., Žnidarič, A., 1994 in Žnidarič, Peruš, 1998), kasneje pa so bile razvite tudi modifikacije za uporabo na armiranobetonskih okvirnih stavbah (Coronelli, 2007). Temelji na detajlnem vizualnem pregledu in popisu poškodb, možno pa je vključiti tudi rezultate preiskav fizikalno-kemijskih karakteristik. Vsako poškodbo se opiše s produktom petih faktorjev, ki izražajo lokacijo poškodbe oziroma pomembnost elementa, kjer se poškodba nahaja, tip poškodbe, jakost poškodbe, obseg poškodbe in nujnost intervencije, kar predstavlja rating posamezne poškodbe. Vsota ratingov vseh poškodb, ki je lahko normirana ali ne, predstavlja rating celotnega objekta. Vsaka poškodba ja kodirana z geslom, kar omogoča razvrščanje poškodb po posameznih sklopih ter identifikacijo kritičnih poškodb. Na podlagi ratingov je mogoče oceniti tudi redukcijski faktor nosilnosti za posamezne elemente. Ta metoda se že več let uporablja pri izvajanju rednih pregledov premostitvenih objektov na regionalnih cestah in avtocestah v Sloveniji.

Ob ustreznih modifikacijah bi metoda lahko bila primerna za potrebe zastavljene naloge.

4 POTRESNA OGROŽENOST SLOVENSКИH SAKRALNIH STAVB

4.1 Splošno

Po uradnih podatkih je bilo ob osamosvojitvi leta 1991 v Sloveniji 2887 cerkva, številka pa se je do danes povečala za nekaj cerkva (Seznam cerkva v Sloveniji, 2012). Od tega je velika večina – več kot 2300 objektov, registriranih kot kulturna dediščina v registru nepremične kulturne dediščine (Register nepr. kultur. dediščine, 2012). Pri tem ima več kot 1400 cerkva status kulturnega spomenika lokalnega ali državnega pomena. Poleg cerkva nepremično kulturno sakralno stavbno dediščino sestavljajo še kapele, kapelice, zvoniki, rotunde, krstilnice, samostani, župnišča, razpela, znamenja, razvaline in drugo. V registru nepremične kulturne dediščine je tako trenutno skupno evidentiranih 6472 enot sakralne stavbne dediščine (Register nepr. kultur. dediščine, 2012). V sklopu naloge bomo obravnavali predvsem tisto sakralno stavbno dediščino, katere potresna varnost je bistvenega pomena za varnost ljudi. Tako ne bomo obravnavali npr. kapelic, razpel in znamenj. Prav tako ne bomo obravnavali objektov, kot so samostani in župnišča, saj so ti objekti po konstrukcijski zasnovi podobni običajnim objektom, ki jih je moč obravnavati z uveljavljenimi metodami za običajne objekte. V sklopu naloge bomo tako obravnavali predvsem cerkve, kapele in zvonike.

4.2 Nabor objektov za analizo

Osnovni nabor objektov povzamemo po (Bosiljkov et al., 2008, Gostič, 2008 in Bosiljkov, Gostič, 2009), kjer je bila narejena podatkovna baza 70 kulturnozgodovinsko pomembnih sakralnih objektov. V bazi so zbrani osnovni podatki o objektu (lokacija objekta, zgodovina objekta, pogostost uporabe, kulturnozgodovinski pomen ...), posnetek objekta (načrti, fotodokumentacija) ter podatki o stanju objekta (kataster poškodb, fotodokumentacija poškodb). Potrebam zastavljene naloge ustreza 56 objektov iz omenjene baze. Poleg teh bomo obravnavali še 8 cerkva iz arhiva Gradbenega inštituta ZRMK in arhiva Državne tehnične pisarne za obnovo Posočja. Za obravnavo so slednji še posebej zanimivi, saj so bili ti objekti nedavno izpostavljeni potresom (potresi v zgornjem Posočju 1998 in 2004), kar omogoča verifikacijo predpostavljenih računskih postopkov.

Na naslednjih straneh so prikazani osnovni podatki (preglednica 2), florisne sheme (slike 9–12), fotografije nekaterih tipičnih objektov (slike 13–18) ter lokacije (slika 8) obravnavanih objektov.

Preglednica 2: Nabor objektov za analizo z osnovnimi podatki o objektih

Table 2: List of buildings for the analysis with some basic information

Št. ^{a)}	EŠD ^{b)}	Ime enote ^{c)}	Tl. zasnova ^{c)}	Umet. slog ^{d)}	Čas gradnje ^{e)}	Status ^{f)}	Uporaba ^{g)}
1	24	Bled - Blejski grad, kapela sv. Ingenuina in Albuina	vzdolžna, enoladijska, (kapela)	gotika	15.–17. st.	KSDP	stalna
2	25	Bled - Cerkev Marijinega vnebovzetja	vzdolžna, enoladijska, z dodanimi kapelami	barok (gotika)	15.–17. st.	KSDP	pogosta
3	621	Bohinj - Cerkev sv. Janeza Krstnika	vzdolžna, enoladijska	gotika	14.–17. st.	KSDP	pogosta
4	3566	Bovec - Cerkev sv. Urha	vzdolžna, enoladijska	neoromanika	18., 19. st.	KS	stalna
5	2069	Brezje - Cerkev sv. Vida (Marija Pomagaj)	vzdolžna, enoladijska, z bočnimi kapelami	neorenesansa	15. st., 1889–90	KD	stalna
6	2911	Brežice - Cerkev sv. Roka	vzdolžno-središčna	barok	17. st.	KS	občasna
7	57	Celje - Cerkev sv. Danijela	vzdolžna, triladijska, z dodanimi kapelami	gotika	14., 15., 16. st.	KS	stalna
8	72	Crngrob - Cerkev Marijinega oznanjenja	vzdolžna, triladijska	gotika	13.–19. st.	KSDP	pogosta
9	3567	Čezsoča - Cerkev sv. Antona Puščavnika	vzdolžna, enoladijska	neoromanika	1927	KD	pogosta
10	3631	Drežnica - Cerkev sv. Srca Jezusovega	vzdolžna, triladijska	neoromanika	1913	KS	stalna
11	152	Gornji Grad - Cerkev sv. Mohorja in Fortunata	vzdolžna, enoladijska, z bočnimi kapelami	barok	18. st.	KS	stalna
12	171	Groblje - Cerkev sv. Mohorja in Fortunata	vzdolžno-središčna	barok	18. st.	KD	stalna
13	179	Hrastovlje - Cerkev sv. Trojice	vzdolžna, triladijska "kapela"	romanika	15., 16. st.	KS	stalna
14	200	Javorca - Spominska cerkev sv. Duha	vzdolžna, triladijska, (neregularna – lesena)	secesija	1916	KSDP	občasna
15	212	Kamnica ob Dravi - Cerkev sv. Martina	vzdolžna, enoladijska, z dodanimi kapelami	barok (gotika)	16.–18. st.	KS	pogosta
16	3836	Kanalski Lom - Cerkev sv. Primoža in Felicijana	vzdolžna, enoladijska	barok	17., 18. st.	KS	pogosta
17	3758	Kobarid - Cerkev sv. Antona Padovanskega	vzdolžna, enoladijska, z dodanimi kapelami	barok	17. st., 1938	KS	pogosta
18	1564	Kočevje - Cerkev sv. Jerneja	vzdolžna, triladijska	neoromanika	1903	KSLP	stalna
19	3766	Komen - Cerkev Marijinega vnebovzetja	vzdolžna, enoladijska	barok (renesansa)	16., 17. st.	KS	pogosta
20	239	Koper - Cerkev Marijinega vnebovzetja	vzdolžna, triladijska	barok (romanika, gotika)	12., 15., 18. st.	KS	stalna
21	238	Koper - Krstilnica sv. Janeza Krstnika	središčna, okrogla	romanika	10.–12., 14., 18. st.	KS	pogosta
22	1749	Krtina pri Domžalah - Cerkev sv. Lenarta in sv. Roka	vzdolžna, triladijska	gotika	15., 16. st.	KD	pogosta
23	309	Laško - Cerkev sv. Martina	vzdolžna, triladijska, z dodanimi kapelami	gotika (romanika, barok)	13., 14., 15., 18. st.	KSLP	stalna
24	1979	Ljubljana - Cerkev Marijinega obiskanja na Rožniku	vzdolžno-središčna	barok	18., 19. st.	KD	pogosta
25	1973	Ljubljana - Cerkev sv. Florijana	vzdolžna, enoladijska, z dodanimi kapelami	barok	17. st.	KSDP	občasna
26	331	Ljubljana - Cerkev sv. Frančiška Asiškega v Šiški	središčna, kvadratna (neregularna)	Plečnik	1927	KSDP	stalna

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 2

Št. ^{a)}	EŠD ^{b)}	Ime enote ^{c)}	Tl. zasnova ^{c)}	Umet. slog ^{d)}	Čas gradnje ^{e)}	Status ^{f)}	Uporaba ^{g)}
27	332	Ljubljana - Cerkev sv. Jakoba	vzdolžna, enoladijska, z bočnimi kapelami	barok	17., 18., 19. st.	KS	stalna
28	2003	Ljubljana - Cerkev sv. Janeza Krstnika v Trnovem	središčna, križna	neoromanika	1857	KD	stalna
29	333	Ljubljana - Cerkev sv. Nikolaja	vzdolžna, enoladijska, z bočnimi kapelami	barok	18. st.	KSDP	stalna
30	915	Ljubljana - Cerkev sv. Petra	vzdolžna, triladijska, z dodanimi kapelami	barok	18., 19. st.	KS	stalna
31	4101	Log pri Vipavi - Cerkev Matere božje Tolažnice žalostnih	vzdolžna, enoladijska, z bočnimi kapelami	barok	17., 18. st.	KS	občasna
32	3136	Maribor - Cerkev sv. Alojzija	vzdolžno-središčna	barok	18. st.	KS	stalna
33	427	Maribor - Cerkev sv. Janeza Krstnika	vzdolžna, triladijska, z dodanimi kapelami	gotika	13.–18. st.	KS	stalna
34	450	Martjanci - Cerkev sv. Martina	vzdolžna, enoladijska	gotika	14., 18. st.	KS	stalna
35	4115	Mengore - Cerkev Imena Marijinega	vzdolžna, enoladijska	historicism	1930	KS	občasna
36	3191	Murska Sobota - Cerkev sv. Nikolaja	vzdolžna, triladijska	secesija, romantika	1912	KS	stalna
37	490	Nova Štifta - Cerkev Marijinega vnebovzetja	središčna, okrogla	barok	17. st.	KSLP	pogosta
38	3211	Olimje - Cerkev Marijinega vnebovzetja	vzdolžna, enoladijska, z bočnimi kapelami	barok	17., 18. st.	KS	stalna
39	516	Piran - Cerkev sv. Jurija	vzdolžna, enoladijska	barok (paladijevstvo)	17. st.	KSDP	pogosta
40	3932	Postojna - Cerkev sv. Štefana	vzdolžno-središčna	barok	18. st.	KS	stalna
41	748	Predenca - Cerkev sv. Roka	vzdolžna, enoladijska	barok	17. st.	KS	občasna
42	591	Ptujska Gora - Cerkev Marije zaščitnice	vzdolžna, triladijska	gotika	14., 15. st.	KS	stalna
43	3324	Rogatec - Cerkev sv. Hiacinte	vzdolžna, enoladijska	barok	18. st.	KS	občasna
44	1568	Rogatec - Cerkev sv. Jerneja	vzdolžno-središčna	barok	18. st.	KS	stalna
45	637	Ruše - Cerkev Matere božje	vzdolžna, enoladijska, z dodanimi kapelami	barok (gotika)	16., 17., 18. st.	KSLP	stalna
46	641	Selo na Goričkem - Cerkev sv. Nikolaja	središčna, okrogla	romanika	13. st.	KS	pogosta
47	651	Sladka Gora - Cerkev Matere božje	vzdolžno-središčna	barok	18. st.	KSDP	stalna
48	658	Slovenj Gradec - Cerkev sv. Duha	vzdolžna, enoladijska	gotika	16. st.	KSDP	pogosta
49	659	Slovenj Gradec - Cerkev sv. Elizabete	vzdolžna, enoladijska, z dodanimi kapelami	barok (gotika)	13., 15., 17. st.	KSLP	stalna
50	3379	Slovenske Konjice - Cerkev sv. Jurija	vzdolžna, dvoladijska	gotika (barok)	13., 18., 19. st.	KS	pogosta
51	2269	Smlednik - Cerkev sv. Urha	vzdolžna, enoladijska, z bočnimi kapelami	neoromanika	1851	KS	stalna
52	710	Suha pri Škofji Loki - Cerkev sv. Janeza Krstnika	vzdolžna, enoladijska	gotika	15., 18. st.	KSDP	stalna
53	1577	Svete gore - Cerkev Matere božje	vzdolžna, triladijska	barok	17. st.	KS	stalna
54	3235	Svete gore - Kapela Lurške Matere božje	vzdolžna, enoladijska, (kapela)	gotika	16. st.	KS	občasna
55	3234	Svete gore - Kapela sv. Boštjana	vzdolžna, enoladijska, (kapela)	gotika	15. st.	KS	občasna
56	3232	Svete gore - Kapela sv. Jurija	vzdolžna, enoladijska, (kapela)	gotika	13., 16. st.	KS	občasna

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 2

Št. ^{a)}	EŠD ^{b)}	Ime enote ^{c)}	Tl. zasnova ^{c)}	Umet. slog ^{d)}	Čas gradnje ^{e)}	Status ^{f)}	Uporaba ^{g)}
57	3233	Svete gore - Kapela sv. Martina	vzdolžna, enoladijska, (kapela)	gotika	zgodnji srednji vek	KS	občasna
58	4035	Šempas - Cerkev sv. Silvestra	središčna, kvadratna	barok	18. st.	KS	stalna
59	3169	Šmartno na Pohorju - Cerkev sv. Martina	vzdolžna, enoladijska, z dodanimi kapelami	romanika	13., 17. st.	KS	stalna
60	4069	Tolmin - Cerkev sv. Urha	vzdolžna, enoladijska	gotika (romanika)	15., 19., 20. st.	KS	občasna
61	787	Tunjice - Cerkev sv. Ane	vzdolžno-središčna	barok	18. st.	KD	stalna
62	791	Turnišče - Cerkev Marijinega vnebovzetja	vzdolžna, enoladijska	gotika	13., 14. st.	KS	stalna
63	4098	Vipava - Cerkev sv. Štefana	vzdolžna, enoladijska, z dodanimi kapelami	barok (gotika)	16., 17., 18. st.	KS	stalna
64	823	Visoko pod Kureščkom - Cerkev sv. Nikolaja	vzdolžna, enoladijska	gotika	15. st.	KSLP	občasna

a) Zaporedna številka objekta

b) Evidenčna številka enote kulturne dediščine v registru nepremične kulturne dediščine

c) Ime enote kulturne dediščine

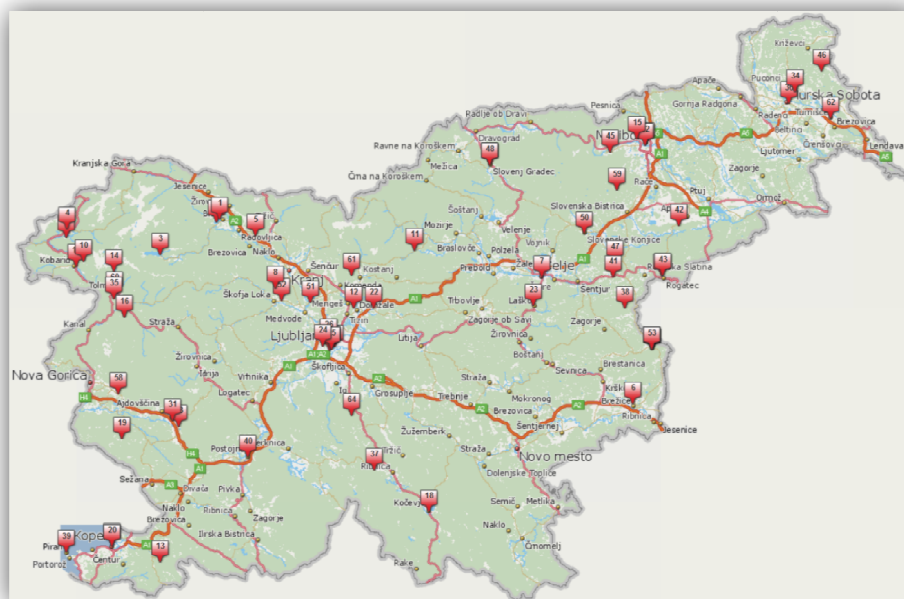
d) Tlorisna zasnova cerkve

e) Umetnostni slog (ocenjen prevladujoč umetnostni slog v smislu nosilne konstrukcije)

e) Čas izgradnje in večjih konstrukcijskih posegov

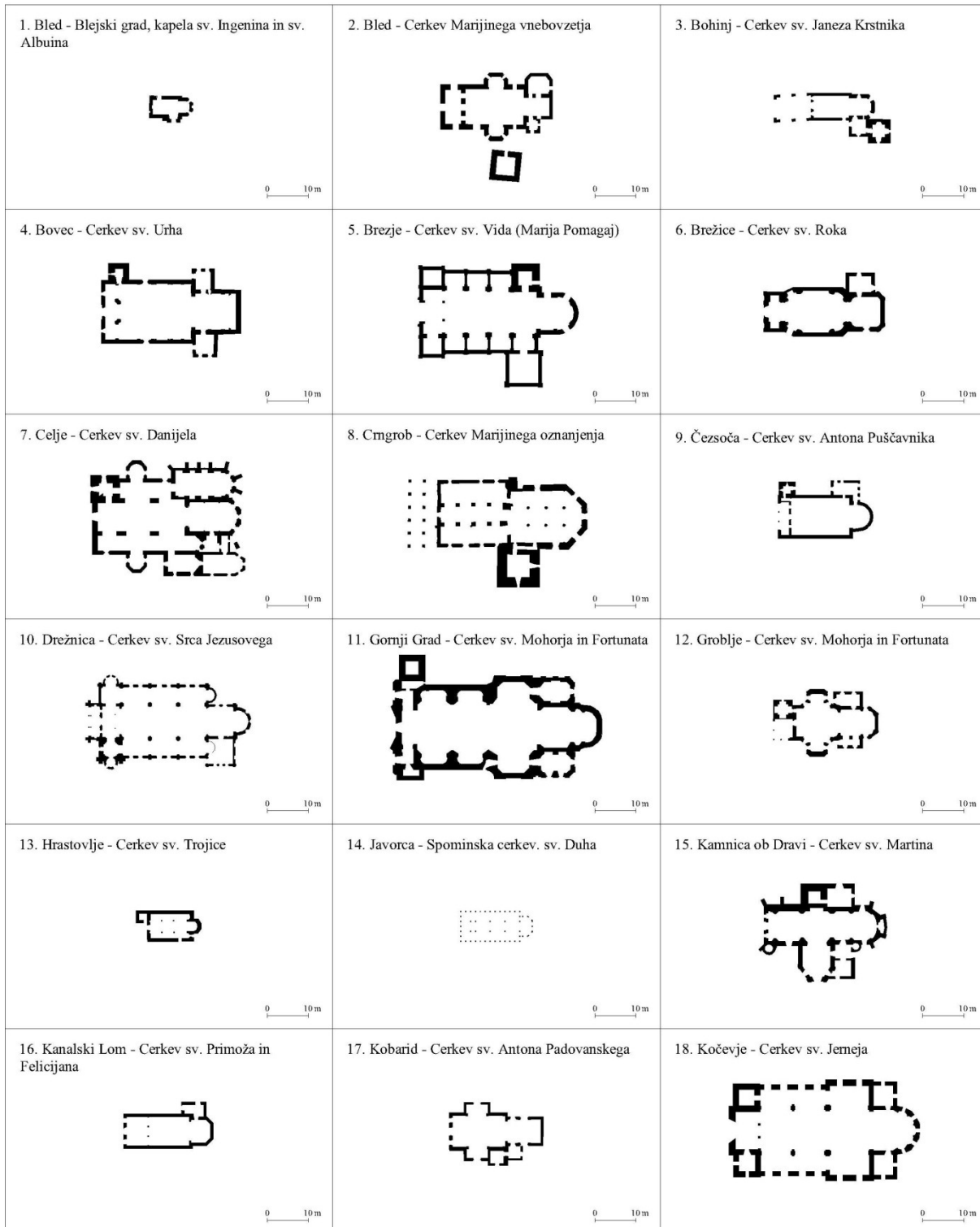
f) Status kulturne dediščine (KSDP – kulturni spomenik državnega pomena, KSLP – kulturni spomenik lokalnega pomena., KS – kulturni spomenik, kjer pomen ni definiran, KD – kulturna dediščina)

g) Pogostost uporabe (stalna – bogoslužje vsaj enkrat dnevno, pogosta – bogoslužje vsaj enkrat tedensko, občasna – bogoslužje manj kot enkrat tedensko)



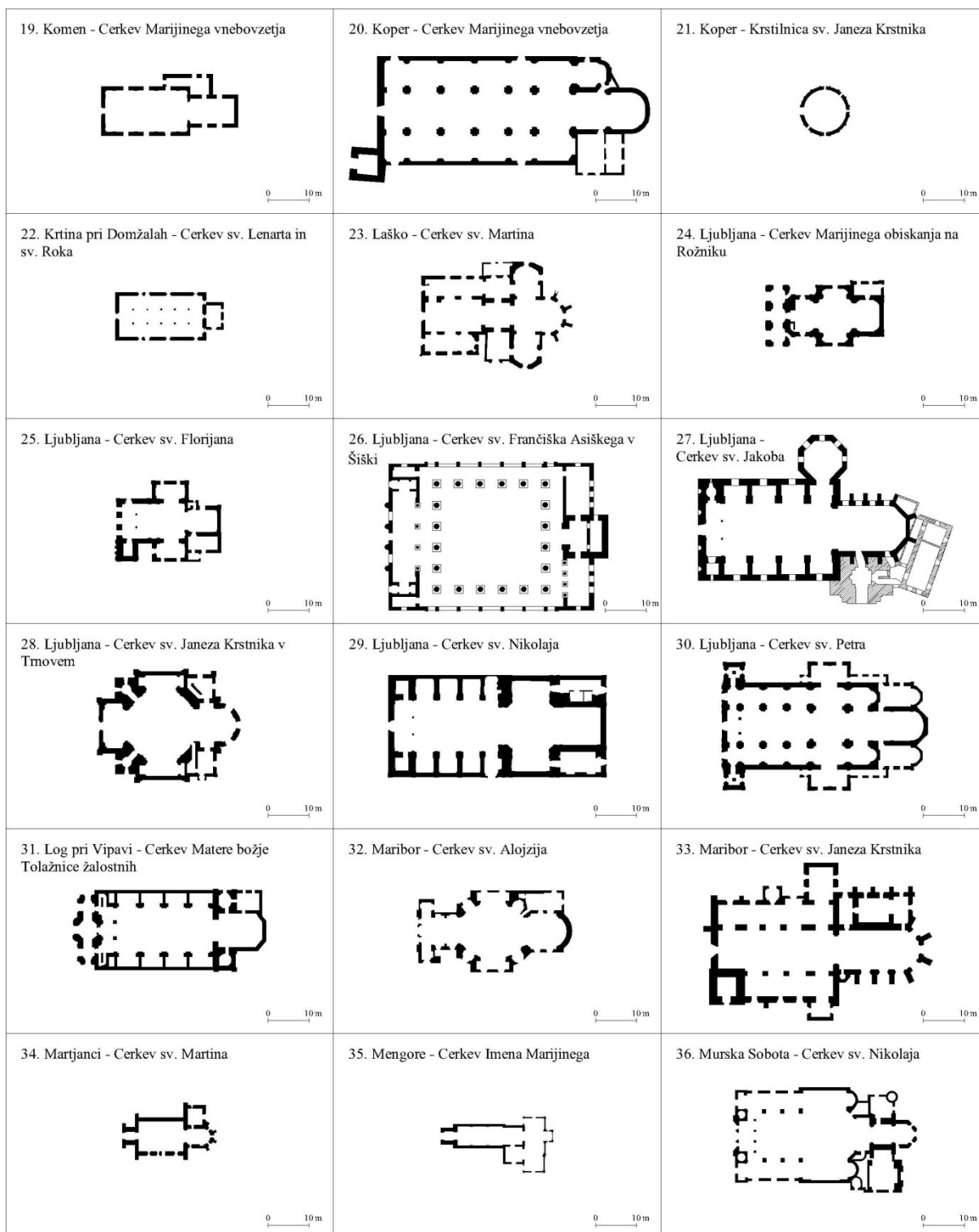
Slika 8: Lokacije obravnavanih cerkva

Figure 8: Locations of analysed churches



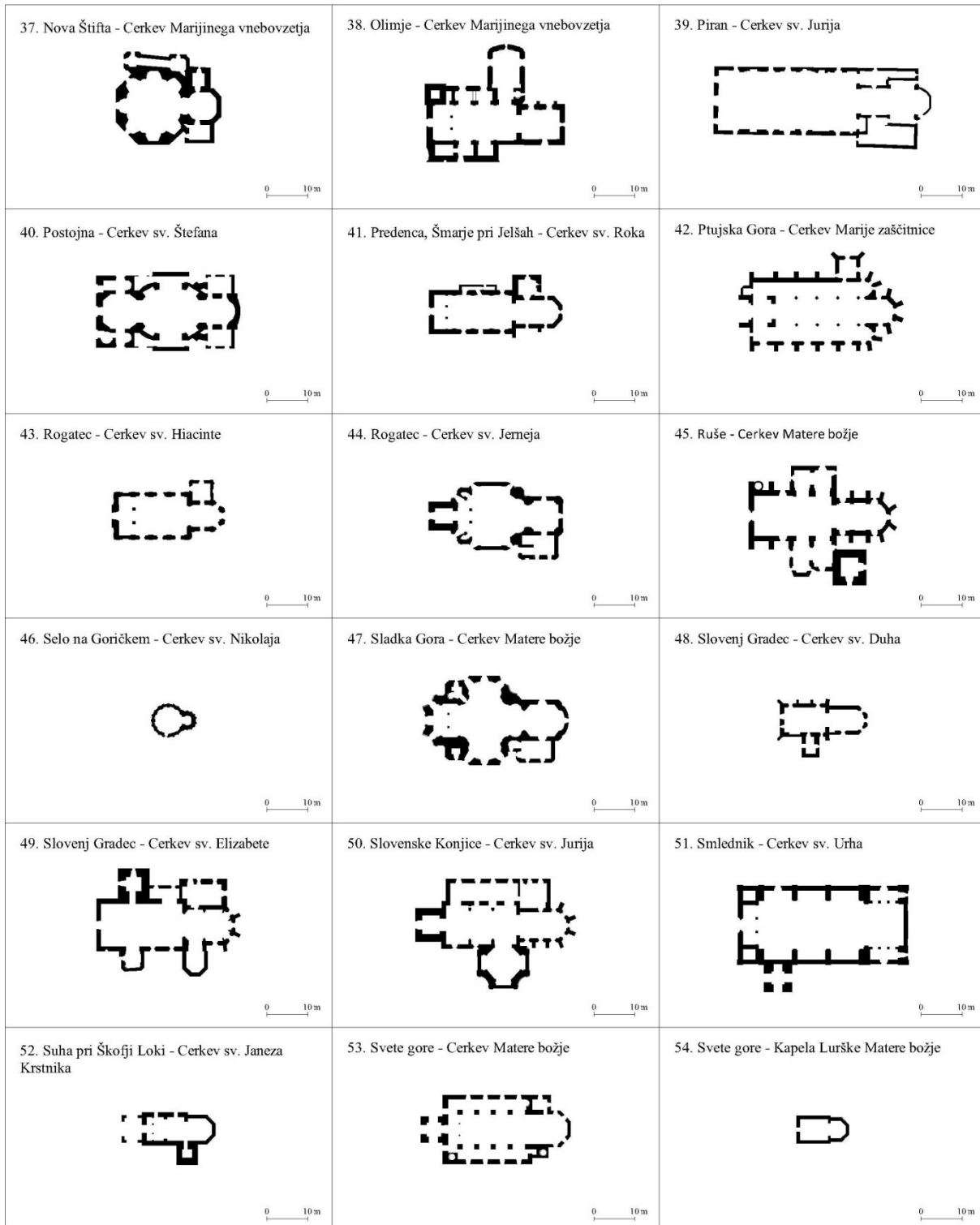
Slika 9: Tlorisi obravnavanih cerkva št. 1–18

Figure 9: Floor plans of analysed churches no. 1–18



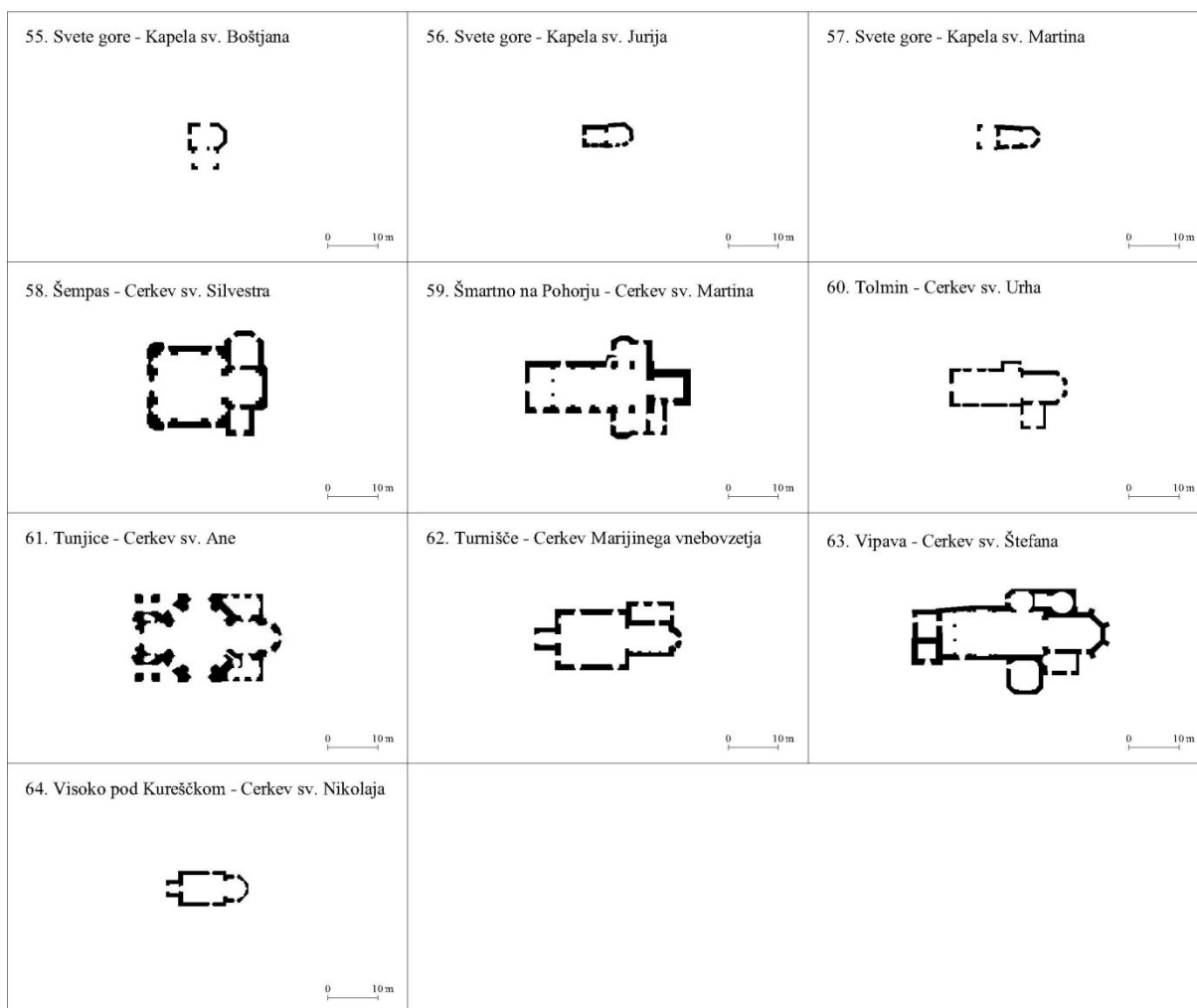
Slika 10: Tlorisi obravnavanih cerkva št. 19–36

Figure 10: Floor plans of analysed churches no. 19–36



Slika 11: Tlorisi obravnavanih cerkva št. 37–54

Figure 11: Floor plans of analysed churches no. 37–54



Slika 12: Tlorisi obravnavanih cerkva št. 55–64

Figure 12: Floor plans of analysed churches no. 55–64



a) Piran - Cerkev sv. Jurija, J fasada. Samostojno stoječi zvonik (kampanile) in krstilnica (desno), (foto: Štampfl, A., 2009).



b) Piran - C. sv. Jurija, pogled proti oltarju. Raven lesen strop, slavolok na stiku ladje in prezbiterja (Bosiljkov, Gostič, 2009).



c) Rogatec - Cerkev sv. Hiacinte, J fasada. Zakristija na stiku ladje in prezbiterja (Bosiljkov, Gostič, 2009).



č) Rogatec - C. sv. Hiacinte, pogled proti vhodu. Kor za pevce (pevska empora), banjasto obokan strop (Bosiljkov, Gostič, 2009).



d) Tolmin - Cerkev sv. Urha, V in S fasada. Zvonik na preslico (foto: Popović, M, 2009).



e) Tolmin - C. sv. Urha. Rebrast obok v prezbiteriju (foto: Popović, M, 2009).

Slika 13: Fotografije nekaterih cerkva z vzdolžno enoladijsko tlorisno zasnovo
Figure 13: Photographs of some churches with longitudinal floor plan and single aisle



a) Drežnica - Cerkev sv. Srca Jezusovega, J fasada (foto: Podgornik, B., 2009).



b) Drežnica - C. sv. Srca Jezusovega, pogled proti oltarju. Bazilikalni prostor za vernike (foto: Štampfl, A, 2009).



c) Javorca - Spomenska cerkev. sv. Duha, Z fasada (foto: Popović, M, 2009).



č) Javorca - Spomenska c. sv. Duha, pogled proti oltarju. Lesena nosilna konstrukcija (foto: Popović, M, 2009).



d) Ptujška Gora - Cerkev Marije zaščitnice, Z fasada (Bosiljkov, Gostič, 2009).



e) Ptujška Gora - C. Marije zaščitnice, pogled proti oltarju. Dvoranski prostor za vernike (Bosiljkov, Gostič, 2009).

Slika 14: Fotografije nekaterih cerkva z vzdolžno triladijsko tlorisno zasnovo

Figure 14: Photographs of some churches with longitudinal floor plan and three aisles



a) Brezje - Cerkev sv. Vida, J fasada (Bosiljkov, Gostič, 2009).



b) Brezje - C. sv. Vida. Bočne kapele (stebri se podaljšajo v prečne stene), (Bosiljkov, Gostič, 2009).



c) Gornji Grad - Cerkev sv. Mohorja in Fortunata, S fasada (Bosiljkov, Gostič, 2009).



č) Gornji Grad - C. sv. Mohorja in Fortunata. Kupola s tamburjem na križišču vzdolžne in prečne ladje (Bosiljkov, Gostič, 2009).



d) Ljubljana - Cerkev sv. Nikolaja, J fasada (Bosiljkov, Gostič, 2009).



e) Ljubljana - C. sv. Nikolaja, pogled proti oltarju. Bočne kapele, slavlolik, kupola (Bosiljkov, Gostič, 2009).

Slika 15: Fotografije nekaterih cerkva z vzdolžno enoladijsko zasnovo in bočnimi kapelami

Figure 15: Photographs of some churches with longitudinal floor plan, one aisle and side chapels



a) Groblje - Cerkev sv. Mohorja in Fortunata, Z fasada (Bosiljkov, Gostič, 2009).



b) Groblje - C. sv. Mohorja in Fortunata, pogled proti oltarju (Bosiljkov, Gostič, 2009).



c) Sladka Gora - Cerkev Matere božje, J fasada (Bosiljkov, Gostič, 2009).



č) Sladka Gora - C. Matere božje. Kupola z laterno (Bosiljkov, Gostič, 2009).



d) Tunjice - Cerkev sv. Ane, J fasada. Kupola z laterno (Bosiljkov, Gostič, 2009).



e) Tunjice - C. sv. Ane. Središčni prostor, izloženi oltarni prostor (Bosiljkov, Gostič, 2009).

Slika 16: Fotografije nekaterih cerkva z vzdolžno-središčno tlorisno zasavo

Figure 16: Photographs of some churches with combined longitudinal and central floor plan



a) Ljubljana - Cerkev sv. Janeza Krstnika v Trnovem, Z fasada. Središčna zasnova s križnim tlorisom (Bosiljkov, Gostič, 2009).



b) Ljubljana - C. sv. Janeza Krstnika v Trnovem, pogled proti oltarju (Bosiljkov, Gostič, 2009).



c) Nova Štifta - Cerkev Marijinega vnebovzvetja, V fasada. Centralna zasnova s poligonalnim tlorisom, cerkveno preddverje (narteks), (Bosiljkov, Gostič, 2009).



č) Nova Štifta - C. Marijinega vnebovzvetja. Središčni prostor, empore nad kapelami (Bosiljkov, Gostič, 2009).



d) Selo na Goričkem – C. sv. Nikolaja, J fasada. Centralna zasnova z okroglim tlorisom (Bosiljkov, Gostič, 2009).



e) Selo na Goričkem – C. sv. Nikolaja. Kupola nad osrednjim prostorom (Bosiljkov, Gostič, 2009).

Slika 17: Fotografije nekaterih cerkva s središčno tlorisno zasnovo

Figure 17: Photographs of some churches with central floor plan



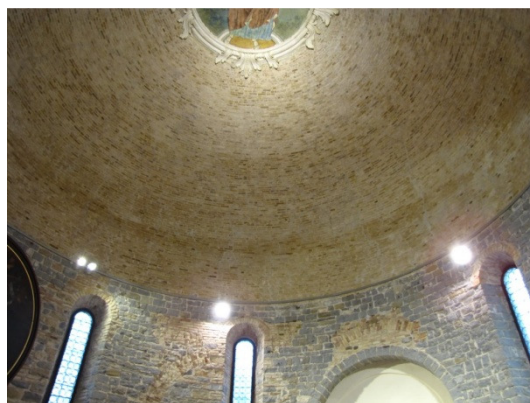
a) Bled - Blejski grad, kapela sv. Ingenuina in Albuina, V fasada (Bosiljkov, Gostič, 2009).



b) Bled - Blejski grad, kapela sv. Ingenuina in Albuina. Apsida s kupolo (Bosiljkov, Gostič, 2009).



c) Koper - Krstilnica sv. Janeza Krstnika, V fasada (Bosiljkov, Gostič, 2009).



č) Koper - Krstilnica sv. Janeza Krstnika. Kupola (Bosiljkov, Gostič, 2009).



d) Svete gore - Kapela Lurške Matere božje, J fasada (Bosiljkov, Gostič, 2009).



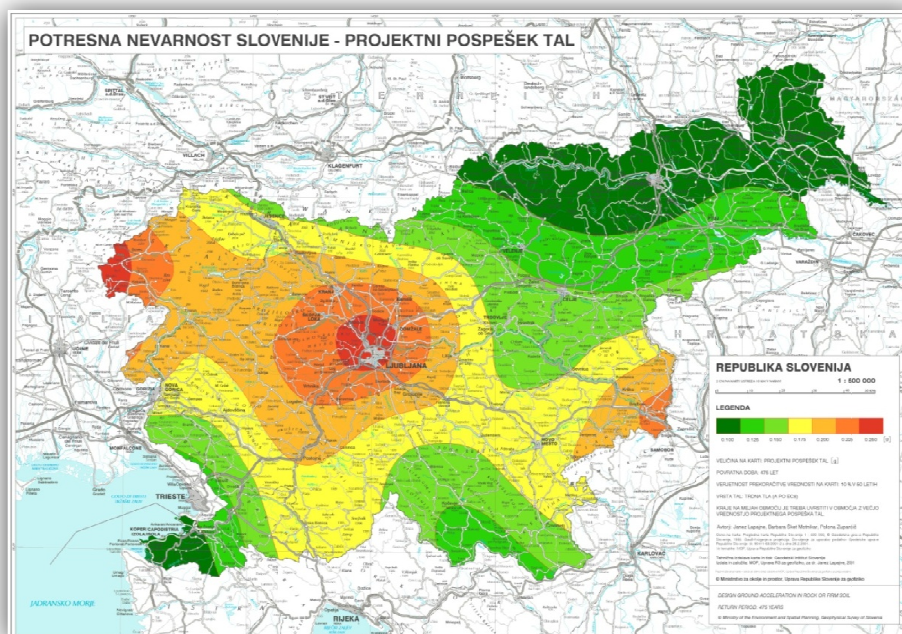
e) Svete gore - Kapela Lurške Matere božje, pogled proti oltarju. Slavoločna stena, raven lesen strop (Bosiljkov, Gostič, 2009).

Slika 18: Fotografije nekaterih kapel in primer krstilnice

Figure 18: Photographs of some chapels and example of baptistery

4.3 Potresna nevarnost

Za določitev potresne nevarnosti upoštevamo standard EC8. Potresno nevarnost določa referenčni pospešek temeljnih tal, ki je podan na karti potresne nevarnosti Slovenije (slika 19). Ta pospešek ustreza povratni dobi 475 let (10 % verjetnost prekoračitve v 50 letih) in se ga upošteva za kontrolo mejnega stanja nosilnosti (zahteva po neporušitvi) za objekte običajne pomembnosti temeljene na skali. Za bolj oziroma manj pomembne objekte se upoštevajo pospeški z večjo oziroma manjšo povratno dobo, kar se zajame s faktorjem pomembnosti γ , s katerim se pomnoži referenčni pospešek. S faktoriranjem referenčne vrednosti pospeška se zajame tudi vpliv temeljnih tal. Tu velja omeniti, da je celotno območje Slovenije potresno nevarno, saj ni območij z nizko seizmičnostjo, kjer bi bil referenčni pospešek tal manjši od 0.1 g. Skladno s standardom EC8 privzamemo tudi prikaz potresnega vpliva s spektri odziva.



Slika 19: Karta projektnih pospeškov temeljnih tal Slovenije (ARSO)

Figure 19: PGA map for Slovenia (ARSO)

Pri obravnavi sakralnih objektov je potreben razmislek glede izbire kategorije pomembnosti objektov. Kot smo že omenili, je skladno s standardom EC8 potrebno bolj pomembne objekte preveriti za močnejši potres, tj. potres z daljšo povratno dobo. EC8 loči štiri kategorije pomembnosti, kot je prikazano v spodnji preglednici.

Preglednica 3: Kategorije pomembnosti objektov v EC8 (SIST EN 1998-1:2005: str. 45)

Table 3: Importance classes for buildings according to EC8 (SIST EN 1998-1:2005: p. 45)

Kategorija pomembnosti	Opis stavbe	Faktor pomembnosti
I	Stavbe manjše pomembnosti za varnost ljudi, npr. kmetijski objekti ipd.	0.8
II	Običajne stavbe, ki ne sodijo v druge kategorije	1.0
III	Stavbe, katerih potresna odpornost je pomembna glede na posledice porušitve, npr. šole, dvorane za srečanja, kulturne ustanove ipd.	1.2
IV	Stavbe, katerih integriteta med potresi je življenjskega pomena za civilno zaščito, npr. bolnišnice, gasilske postaje, elektrarne ipd.	1.4

Glede na gornji opis bi sakralne objekte lahko uvrstili v II. ali morda III. kategorijo. Pri tem se zastavlja vprašanje, kako upoštevati kulturnozgodovinski pomen in kako pogostost uporabe objekta. Ni namreč dorečeno, ali je npr. romarska bazilika z dnevnimi gručami romarjev bolj pomembna od sicer redko obiskane kapele, ki pa vsebuje freske neprecenljive vrednosti. Možna rešitev bi bila modifikacija faktorjev pomembnosti, ki bi upoštevala pomembnost objekta tako v smislu kulturnozgodovinskega pomena kot tudi v smislu pogostosti uporabe. Takšna rešitev je podana v italijanskih smernicah za ugotavljanje in zmanjševanje potresnega tveganja kulturnozgodovinskih objektov (Calvi, Cecchi, 2007), kot je prikazano v spodnji preglednici.

Preglednica 4: Faktorji pomembnost γ za različne kategorije pomembnosti in pogostosti uporabe (Calvi, Cecchi, 2007: str. 24)

Table 4: Importance factors γ for different categories of importance and categories of use (Calvi, Cecchi, 2007: p. 24)

Kategorija pogostosti uporabe	Kategorija pomembnosti		
	Nizka	Srednja	Visoka
Občasna ali ni v uporabi	0.50	0.65	0.80
Pogosta uporaba	0.65	0.80	1.00
Stalna uporaba	0.80	1.00	1.20

V okviru naloge bomo pri vrednotenju potresne nevarnosti privzeli vrednosti faktorjev pomembnosti, podanih v preglednici 4. Pri tem bomo za določitev kategorije pogostosti uporabe upoštevali sledeč kriterij:

- stalna uporaba: bogoslužje vsaj enkrat dnevno,
- pogosta uporaba: bogoslužje vsaj enkrat tedensko,
- občasna uporaba: bogoslužje manj kot enkrat tedensko.

Za določitev kategorije pomembnosti bomo upoštevali sledeč kriterij:

- visoka pomembnost: kulturni spomenik,
- srednja pomembnost: kulturna dediščina, ki nima statusa kulturnega spomenika,
- nizka pomembnost: ni v registru nepremične kulturne dediščine.

4.4 Izbira metode

Pregled literature je pokazal, da so v svetu razvite številne metode za ocenjevanje potresne ranljivosti in ogroženosti objektov. Med njimi je tudi nekaj takih, ki neposredno ustrezajo potrebam zastavljene naloge, tj. ugotavljanje potresne ogroženosti sakralnih objektov z uporabo hitrih metod. Te metode so: metoda s poenostavljenimi indeksi za cerkve ter makroseizmična modela RISK-UE metode na 1. in 2. nivoju. V nadaljevanju preverimo uporabnost teh treh metod na izbranem naboru slovenskih sakralnih objektov.

4.5 Metoda s poenostavljenimi indeksi za cerkve

4.5.1 Opis metode

Metodo so predlagali portugalski avtorji (Lourenço, Roque, 2005 in Lourenço, Oliveira, 2005) in je namenjena hitri oceni potresne ogroženosti cerkvenih objektov. Temelji na izračunu treh geometrijskih indeksov, ki se določijo le na podlagi osnovnih geometrijskih podatkov o objektu.

Prvi indeks (γ_1) izraža delež nosilnih zidov v posamezni smeri objekta glede na tlorisno površino celotnega objekta. Določen je z izrazom:

$$\gamma_{1,i} = A_{w,i} / S_{tl}, \quad (1)$$

kjer sta:

$A_{w,i}$ površina prereza nosilnih zidov v smeri »i« ($i = x, y$) in

S_{tl} tlorisna površina celotnega objekta.

Pri določitvi nosilnih zidov se upoštevajo samo zidovi sposobni za prevzem horizontalne obtežbe, skladno s priporočili EC8. Pri tem se dopušča možnost, da je vsota površin nosilnih zidov v dveh pravokotnih smereh lahko večja od celotne površine nosilnih zidov (vogali zidov se lahko upoštevajo kot nosilni v obeh smereh).

Mejne vrednosti indeksa so odvisne od seizmičnosti lokacije. Za kulturnozgodovinske objekte avtorji metode predlagajo minimalno vrednost 10 % za območja visoke seizmičnosti, z manjšanjem seizmičnosti pa se potreben delež zidov linearno zmanjšuje (slika 20). Podobna priporočila glede potrebnega deleža zidov najdemo tudi v standardu EC8. Za enostavne zidane zgradbe (novogradnje), za katere ob izpolnjevanju danih pogojev računsko kontrola potresne odpornosti ni potrebna, standard podaja minimalne deleže zidov v odvisnosti od seizmičnosti in števila etaž. Za enostavne zidane zgradbe grajene iz nearmiranega zidovja znašajo potrebni deleži zidov od 2 do 5 %.

Drugi indeks (γ_2) izraža razmerje med površino prereza nosilnih zidov in celotno težo objekta. Podan

je z enačbo:

$$\gamma_{2,i} = A_{w,i} / W, \quad (2)$$

kjer sta:

$A_{w,i}$ površina prereza nosilnih zidov v smeri »i« ($i = x, y$) in

W teža celotnega objekta.

Avtorji metode kot mejno vrednost za kulturnozgodovinske objekte na območjih visoke seizmičnosti navajajo vrednost $2.5 \text{ m}^2/\text{MN}$. Z manjšanjem seizmičnosti se mejna vrednost linearno zmanjšuje (slika 20).

Tretji indeks (γ_3) izraža razmerje med strižno nosilnostjo objekta in celotno strižno silo ob vpetju.

Podan je z enačbo:

$$\gamma_{3,i} = V_{Rd,i} / V_E, \quad (3)$$

kjer sta:

$V_{Rd,i}$ celotna strižna nosilnost objekta v »i« smeri ($i = x, y$) in

V_E celotna strižna sila ob vpetju pri potresni obtežbi.

Celotna strižna nosilnost objekta se določi kot vsota strižnih nosilnosti posameznih zidov, ki se izračunajo skladno z EC6:

$$V_k = f_{vk} \cdot t \cdot l_c, \quad (4)$$

$$f_{vk} = f_{vk0} + 0.4\sigma_0. \quad (5)$$

Ob predpostavkah: da so vsi zidovi enake kvalitete, da so obremenjeni s povprečno vertikalno tlačno napetostjo $\sigma_0 = W/A_w$ ter da je cel zid v tlaku, se ocena za celotno strižno nosilnost objekta glasi:

$$V_{Rd,i} = A_{w,i} \cdot f_{vk} = A_{w,i} \cdot (f_{vk0} + 0.4\sigma_0) = A_{w,i} \cdot \left(f_{vk0} + 0.4 \frac{W}{A_w} \right). \quad (6)$$

Pri tem oznake v gornjih treh enačbah pomenijo:

$A_{w,i}$ površina nosilnih zidov v smeri »i« ($i = x, y$),

A_w površina vseh nosilnih zidov,

f_{vk} karakteristična strižna trdnost zidovja,

f_{vk0} karakteristična začetna strižna trdnost zidovja pri ničelni tlačni napetosti,

σ_0 povprečna tlačna napetost v zidovih,

W teža celotnega objekta,

V_k karakteristična strižna nosilnost posameznega zidu,

t debelina zidu, ki prevzema strig,

l_c dolžina tlačnega dela zidu.

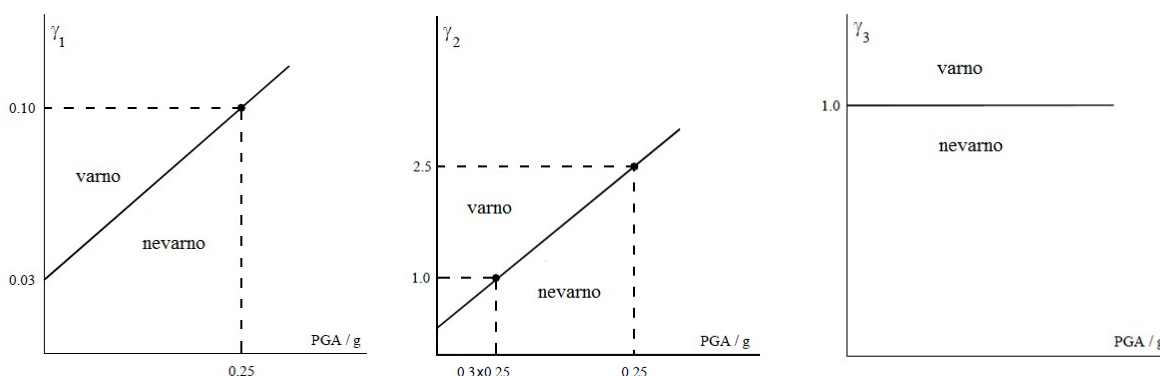
Celotna strižna sila ob vpetju se določi kot pri metodi z nadomestno statično obtežbo (metoda z vodoravnimi silami, EC8):

$$V_E = W \cdot \beta, \quad (7)$$

kjer je β seizmični koeficient, ki upošteva projektni pospešek temeljnih tal.

Ob upoštevanju gornjih izrazov se enačba za indeks γ_3 glasi:

$$\gamma_{3,i} = \frac{A_{wi}}{A_w} \left(\frac{f_{vk0} \cdot A_w}{W} + 0.4 \right) \frac{1}{\beta} = \frac{A_{wi}}{A_w} \left(\frac{f_{vk0}}{\sigma_0} + 0.4 \right) \frac{1}{\beta}, \quad (8)$$



Slika 20: Mejne vrednosti za indekse γ_1 , γ_2 in γ_3 (Lourenço, Oliveira 2005: str. 457)

Figure 20: Thresholds for indexes γ_1 , γ_2 and γ_3 (Lourenço, Oliveira 2005: p. 457)

Komentar

Vsi trije indeksi izhajajo iz predpostavke, da je potresna ranljivost objekta odvisna predvsem od potresne odpornosti zidov. Pri prvem indeksu mero za potresno odpornost predstavlja delež zidov glede na tlorisno površino, pri drugem razmerje med površino zidov in težo, pri tretjem pa gre za poenostavljen izračun dejanske potresne odpornosti zidov. Gre torej za indekse, ki z različno natančnostjo izražajo neko mero posplošene potresne odpornosti. Pri tem prva dva indeksa odražata potresno odpornost, tretji indeks pa je v bistvu že indeks potresne varnosti, saj je odvisen od seizmičnosti. Del indeksa γ_3 , ki izraža samo odpornost konstrukcije, bomo označevali z γ_3^* .

$$\gamma_3 = \frac{V_{Rd}}{V_{Ed}} = \frac{V_{Rd}}{W \cdot \beta} = \frac{\gamma_3^*}{\beta} \quad (9)$$

$$\gamma_3^* = \frac{V_{Rd}}{W} \quad (10)$$

Osnovni indeks, na podlagi katerega je moč sklepati na potresno odpornost objekta, je indeks γ_1 . Njegova prednost je enostavnost izračuna, glavna slabost pa dejstvo, da ne zajema teže objekta, ki lahko bistveno vpliva na obnašanje objektov ob potresih. Korektna določitev mejnih vrednosti brez dodatnih pogojev (npr. višina objekta) je zato vprašljiva. Indeks γ_2 je v tem pogledu boljši, ne zajema pa materialnih karakteristik zidov. Poleg tega indeks ni brezdimenzionalen. Glavni problem predstavlja določitev mejnih vrednosti. Tretji indeks γ_3 odpravlja pomanjkljivosti prvih dveh in je primerljiv z običajnim pristopom preverjanja varnosti konstrukcij.

V nadaljevanju bomo več pozornosti posvetili indeksu γ_3 , za katerega smatramo, da je izmed treh indeksov najbolj zanesljiv indikator potresne ranljivosti oziroma ogroženosti. Poleg tega so mejne vrednosti indeksa z upoštevanjem seizmičnosti jasno opredeljene, indeks omogoča upoštevanje materialnih parametrov ter tudi neposredno verifikacijo z natančnejšimi računskimi analizami. Potrebno je še opomniti, da nobeden od teh indeksov ne zajema pojavov izvenravninskih porušnih mehanizmov, ki so lahko merodajni, zlasti v primerih, ko zidovi niso ustrezno povezani z vezmi.

4.5.2 Modifikacija metode za slovenske razmere

4.5.2.1 Potresna obtežba

Za določitev potresne obtežbe upoštevamo standard EC8 s pripadajočo karto potresne nevarnosti Slovenije. Celotno strižno silo ob vpetju ($V_E = F_b$) določimo z enačbo, ki jo podaja EC8 pri poenostavljeni metodi z vodoravnimi silami:

$$F_b = S_d(T_1) \cdot m \cdot \lambda, \quad (11)$$

kjer so:

$S_d(T_1)$ ordinata v projektnem spektru pri osnovnem nihajnem času T_1 ,

m celotna masa stavbe,

λ korekcijski faktor, ki ima vrednost $\lambda = 0.85$, če velja $T_1 \leq 2 T_C$ in ima stavba več kot dve etaži.

V drugih primerih velja $\lambda = 1.0$.

Pri tem predpostavimo, da obravnavani sakralni objekti glede dinamičnih karakteristik spadajo med objekte s kratkimi periodami ($T_B \leq T_1 \leq T_C$). Ker so sakralni objekti v splošnem pritlični objekti, upoštevamo $\lambda = 1.0$. Ob navedenih predpostavkah ordinato v projektnem spektru določa enačba:

$$S_d(T_1) = \gamma_I \cdot \alpha_{gR} \cdot g \cdot S \cdot \frac{2.5}{q}, \quad (12)$$

kjer so:

- γ_I faktor pomembnosti objekta,
- α_{gR} razmerje med referenčnim pospeškom temeljnih tal a_{gR} in težnostnim pospeškom g ,
- g težnostni pospešek,
- S faktor temeljnih tal,
- q faktor obnašanja konstrukcije.

Za faktor pomembnosti upoštevamo vrednosti podane v preglednici 4, s katerimi zajamemo tako kulturnozgodovinski pomen objekta kot tudi pogostost uporabe objekta. α_{gR} podaja karta potresne nevarnosti Slovenije in znaša od 0.1 do 0.25 (slika 19). Faktor tal S je odvisen od tipa tal in znaša od 1.0 do 1.7 (preglednica 5). Za določitev tipa tal so v splošnem potrebne geomehanske preiskave tal. V kolikor te niso izvedene (ne poznamo tipa tal), bomo v okviru naloge predpostavili srednjo kvaliteto tal: tip tal B s faktorjem tal $S = 1.2$. Faktor obnašanja q zajema sposobnost konstrukcije za sipanje energije pri potresni obtežbi in je odvisen od konstrukcijskega sistema. Skladno s standardom EC8 se za konstrukcije grajene iz nearmiranega zidovja upošteva $q = 1.5-2.5$, za konstrukcije iz povezanega zidovja $q = 2.0-3.0$, za armirano zidovje pa $q = 2.5-3.0$. Slovenski nacionalni dodatek k standardu predpisuje uporabo nižjih izmed navedenih vrednosti. Obravnavani objekti se uvrščajo v kategorijo nearmiranega zidovja, zato bomo upoštevali faktor obnašanja $q = 1.5$.

Preglednica 5: Vrednosti parametrov tipa tal, ki opisujejo elastični spekter odziva (SIST EN 1998-1: 2005/A101:2009: str. 6)

Table 5: Values of the soil type parameters describing the elastic response spectra (SIST EN 1998-1: 2005/A101:2009: p. 6)

Tip tal	S	T_B [s]	T_C [s]	T_D [s]
A	1.0	0.10	0.40	2.00
B	1.2	0.15	0.50	2.00
C	1.15	0.20	0.60	2.00
D	1.35	0.20	0.60	2.00
E	1.7	0.10	0.40	2.00

Ob upoštevanju navedenih predpostavk se celotna prečna sila ob vpetju glasi:

$$V_E = F_b = S_d(T_1) \cdot m \cdot \lambda = \gamma_I \cdot \alpha_{gR} \cdot g \cdot S \cdot \frac{2.5}{q} \cdot m \cdot \lambda = \gamma_I \cdot \alpha_{gR} \cdot S \cdot \frac{2.5}{q} \cdot W, \quad (13)$$

koeficient β pa:

$$\beta = \gamma_I \cdot \alpha_{gR} \cdot S \cdot \frac{2.5}{q}. \quad (14)$$

4.5.2.2 Določitev teže celotne konstrukcije

Za določitev teže konstrukcije upoštevamo kombinacijo vplivov skladno z EC8 in EC0 z enačbo:

$$\sum G_{k,j} + \sum \psi_{E,i} \cdot Q_{k,i}, \quad (15)$$

kjer so:

- $G_{k,j}$ karakteristična vrednost stalnega vpliva j ,
- $Q_{k,i}$ karakteristična vrednost spremenljivega vpliva i ,
- $\psi_{E,i}$ koeficient za kombinacijo za spremenljiv vpliv i .

Koristna obtežba je v večini primerov prisotna le na nivoju tlaka pritličja, zato ne sodeluje pri nihanju konstrukcije zaradi potresnega vpliva. Izjema je koristna obtežba na emporah (kor za pevce) in morebitnih pomožnih prostorih nadzemnih etaž, kar pa, glede na majhen prispevek k celotni masi konstrukcije, zanemarimo. Obtežba s snegom na strehi se v skladu s standardom Evrokod ne upošteva ($\psi_{E,i} = 0$). Pri določitvi teže konstrukcije tako upoštevamo le stalne vplive (lastna teža nosilnih in nenosilnih elementov).

Ker gre za hitro, poenostavljeno metodo, kjer ne razpolagamo s popolnimi posnetki objektov in podatki o materialnih karakteristikah vgrajenih materialov, so pri določitvi teže konstrukcije potrebne določene poenostavitve in ocene. V večini primerov imamo na razpolago le tloris objekta z višinami posameznih prostorov. Na sestavo nosilnih in nenosilnih elementov je moč sklepati iz podatkov o obdobju gradnje objekta in iz struktur zidov, ki so vidne na neometanih delih zidov (slike 21, 22, 23 in 24).

Za prostorninske teže zidov in stropov upoštevamo sledeče:

- kamniti elementi $\gamma = 22 \text{ kN/m}^3$
- opečni elementi (polna opeka) $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$
- AB elementi $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$

Stropovi so lahko obokani, grajeni iz kamna ali opeke, ali pa so v leseni izvedbi. Predvsem je problematična določitev teže obokanih stropov, kjer večinoma ne poznamo debeline obokov. V teh primerih upoštevamo povprečne debeline obokov, na katere sklepamo iz primerov z znanimi podatki:

- kamniti oboki z velikimi razpetinami ($l > 7 \text{ m}$) $d = 50 \text{ cm}$
- kamniti oboki z manjšimi razpetinami ($l < 7 \text{ m}$) $d = 30 \text{ cm}$
- opečni oboki $d = 25 \text{ cm}$

Za lesene strope in podeste upoštevamo povprečno obtežbo $g = 1.0 \text{ kN/m}^2$, za strehe (vključno z ostrešjem) pa povprečne obtežbe glede na vrsto kritine:

- bobrovec, enojni (dvojni) $g = 1.0 \text{ kN/m}^2$ (1.3 kN/m^2)
- korci, brez malte (korci v malti) $g = 1.3 \text{ kN/m}^2$ (1.6 kN/m^2)

- | | |
|--|---|
| • skril, enojni (dvojni) | $g = 1.1 \text{ kN/m}^2 (1.8 \text{ kN/m}^2)$ |
| • ravne vlaknocementne plošče (eternit) | $g = 0.85 \text{ kN/m}^2$ |
| • valovite vlaknocementne plošče (salonit) | $g = 0.65 \text{ kN/m}^2$ |
| • bakrena kritina | $g = 0.8 \text{ kN/m}^2$ |

Posebnost pri določevanju teže objekta predstavljajo zvoniki. V primerih, kjer so ti povsem ločeni od glavnega objekta, ali v primerih, kjer je razvidno, da niso povezani z zidovi glavnega objekta (naknadno grajeni zvoniki), jih ne upoštevamo pri določitvi mase objekta. V primerih, kjer pa so zvoniki integrirani v nosilno zidovje glavnega objekta, jih pri računu mas upoštevamo, vendar le do višine kapa glavnega objekta. Predpostavljamo namreč, da višji deli zvonikov zaradi bistveno različnih dinamičnih karakteristik ne vplivajo bistveno na globalno obnašanje osnovnega objekta.

4.5.2.3 Delež zidov

V vseh treh indeksih (γ_1 , γ_2 in γ_3) kot glavni parameter potresne odpornosti nastopa površina nosilnih zidov v posamezni smeri, pri čemer pa njena določitev ni povsem definirana. Za horizontalni prerez, ki določa površino nosilnih zidov, upoštevamo horizontalni prerez na nivoju odprtih, saj potresno odpornost določa predvsem obnašanje slopov med odprtinami. Če so na steni prisotne odprtine v več nivojih, kot merodajne upoštevamo najnižje odprtine. Pri tem bi bilo potrebno korigirati tudi težo objekta tako, da bi pri računu W upoštevali le težo nad obravnavanim prerezom. Kljub temu zaradi enostavnosti metode v računih upoštevamo celotno težo objekta, s čimer smo na varni strani.

Avtorji metode predlagajo, da se pri računu površine nosilnih zidov upoštevajo le tisti zidovi, ki ustrezajo kriterijem za strižne stene skladno s standardom EC8. Standard podaja določene geometrijske zahteve, ki jim morajo elementi ustrezati, v nasprotnem primeru pa se elementi upoštevajo kot sekundarni potresni elementi, ki so v smislu prevzema potresne obtežbe nenosilni. Podane so zahteve glede minimalne efektivne debeline (t_{ef}), maksimalnega razmerja efektivne višine proti efektivni debelini (h_{ef}/t_{ef}) ter minimalnega razmerja dolžine proti višini elementa (l/h). Pri tem se efektivna debelina in efektivna višina elementa določita v skladu s standardom EC6. Efektivna debelina (t_{ef}) poleg dejanske debeline vključuje tudi vpliv utrditvenih slopov in je tako lahko večja od dejanske debeline zidu. Efektivna višina elementa je odvisna od pogojev vpetja zidov (način vpetja na horizontalnih robovih, števila utrjenih vertikalnih robov), dolžine elementa in etažne višine. Pri računu razmerja l/h predstavlja l dolžino elementa, h pa večjo od vrednosti svetlih višin odprtih na obeh straneh elementa. Priporočene vrednosti geometrijskih karakteristik za različne konstrukcijske sisteme so podane v preglednici 6.

Preglednica 6: Priporočene geometrijske zahteve za strižne stene (SIST EN 1998-1: 2005/A101:2009: str. 12)

Table 6: Recommended geometric requirements for shear walls (SIST EN 1998-1: 2005/A101:2009: p. 12)

Vrsta gradnje	$t_{ef,min}$ [mm]	$(h_{ef}/t_{ef})_{max}$	$(l/h)_{min}$
Nearmirano, z zidaki iz naravnega kamna	350	9	0.5
Nearmirano s katerimikoli drugimi vrstami zidakov	190	15	0.4
Nearmirano s katerimikoli drugimi vrstami zidakov, v primerih nizke seizmičnosti	190	15	0.35
Povezano zidovje	190	15	0.3
Armirano zidovje	190	15	ni omejitve

Kriterij minimalne debeline zidov t_{ef} pri obravnavanih objektih ne bo merodajen, saj so zidovi sakralnih objektov praviloma precej debelejši, kot so minimalne zahteve. Te za kamnite zidove znašajo 35 cm, za opečne zidove pa 19 cm. Kriterij h_{ef}/t_{ef} bo merodajen pri tankih in visokih elementih, ki so hkrati tudi razmeroma dolgi (dolžina elementa lahko povečuje efektivno višino). Ta kriterij lahko v nekaterih primerih (predvsem pri enostavnih enoladijskih cerkvah) izloči glavne nosilne zidove, zato ga pri določitvi površine nosilnih zidov ne bomo upoštevali. Kriterij l/h izloči stebre in vitke slope, kar je smiselno, saj ti zaradi svoje majhne togosti glede na stene ne prispevajo bistveno k potresni odpornosti objekta.

4.5.2.4 Mehanske karakteristike in strižna nosilnost zidov

Račun indeksa γ_3 zahteva poleg podatkov o površini sten, teži objekta in seizmičnih parametrov tudi podatek o mehanskih karakteristikah zidovja. Za oceno strižne nosilnosti objekta potrebujemo podatek o karakteristični začetni strižni trdnosti zidovja f_{vko} . Pri novogradnjah se vrednost začetne strižne trdnosti lahko določi na osnovi poznavanja materialnih karakteristik osnovnih gradnikov zidovja, tj. zidakov in malte, pri analizi obstoječih objektov pa je potrebno mehanske karakteristike načeloma določiti s preiskavami. Če se preiskave ne izvajajo, se za mehanske karakteristike lahko uporabijo rezultati preiskav podobnih zidov, pri čemer pa se zaradi negotovosti vrednosti reducirajo z dodatnimi varnostnimi faktorji.

Pri zidovih, ki tvorijo kulturnozgodovinske objekte, je določitev karakteristične začetne strižne trdnosti problematična zaradi pomanjkanja eksperimentalnih podatkov. Raziskovalci namreč ugotavljajo, da pri starejšem zidovju, predvsem pri kamnitem in debelejšem opečnem zidovju, kjer se izmenjujejo prečno in vzdolžno položene opeke, karakteristična začetna strižna trdnost po definiciji, ki jo navaja EC6, eksperimentalno ni določljiva (Tomažević, 2008, Tomažević, 2009). Za zidovje grajeno iz neoblikovanega kamnitega gradiva uporaba kriterija strižne trdnosti ni smiselna (Bosiljkov, Kržan, 2012). Strižno odpornost takšnih zidov je mogoče določiti z računom glavnih nateznih napetosti dobljenih s preiskavami, kjer se zid obravnava kot elastičen, homogen in izotropen material (Bosiljkov, Kržan, 2012). V nadaljevanju naloge bomo zato enačbo (8) nekoliko prilagodili, in sicer

tako, da bomo pri določitvi celotne strižne nosilnosti objekta (6) namesto strižne nosilnosti zidov, ki temelji na prestrižnem porušnem mehanizmu (4), upoštevali strižno nosilnost, ki temelji na formiranju diagonalnih razpok. Za strižno nosilnost zidovja upoštevamo enačbo, ki sta jo leta 1971 razvila Turnšek in Čačovič, ter je preverjena s številnimi eksperimenti (Tomažević 2008):

$$H_{u.s} = C_R \cdot A \frac{f_t}{b} \sqrt{\frac{\sigma_0}{f_t} + 1}. \quad (16)$$

Oznake v enačbi pomenijo:

$H_{u.s}$ mejna strižna nosilnost zidu,

C_R faktor redukcije nosilnosti, ki predstavlja razmerje med maksimalno in računsko (idealizirano) nosilnostjo zidu (upoštevamo vrednost 0.9),

A površina prereza zidu,

f_t referenčna natezna trdnost zidu,

b faktor razporeditve strižnih napetosti po vodoravnem prerezu zidu, odvisen od geometrije zidu ter od razmerja med navpično in vodoravno obtežbo zidu pri porušitvi. Vrednost faktorja variira od 1.5 v primeru vitkih zidov, do 1.1 v primeru čokatih zidov (upoštevamo vrednost 1.1),

σ_0 povprečna tlačna napetost v zidu.

Opomniti velja, da sicer obe enačbi določata strižno nosilnost zidu, pri čemer pa opisujeta drugačen porušni mehanizem. Prva enačba predpostavlja porušitev po horizontalni ravnini, druga enačba pa predpostavlja formiranje diagonalnih razpok v zidu. V tem oziru je druga enačba bližje dejanskemu obnašanju zidov kulturnozgodovinskih objektov pri potresni obtežbi. Poleg tega je materialni parameter f_t , ki nastopa v drugi enačbi, eksperimentalno določljiv tudi v primeru starejšega kamnitega in opečnega zidovja, v strokovni literaturi (npr.: Bosiljkov, Kržan, 2012, OPCM 3274, 2003, Tomažević, 1987, Tomažević, 2009) pa so dosegljivi eksperimentalni podatki za različne tipe zidovja.

Če enačbi (16) in (7) upoštevamo v enačbi (3), dobimo:

$$\gamma_{3,i} = \frac{A_{wi} \cdot C_R \cdot f_t}{A_w \cdot b \cdot \sigma_0} \sqrt{\frac{\sigma_0}{f_t} + 1} \frac{1}{\beta}. \quad (17)$$

Če upoštevamo še enačbo (14) za koeficient seizmičnosti β , dobimo modificirano enačbo za račun indeksa γ_3 , ki jo upoštevamo v nadaljnjih analizah:

$$\gamma_{3,i} = \frac{A_{wi} \cdot C_R \cdot f_t}{A_w \cdot b \cdot \sigma_0} \sqrt{\frac{\sigma_0}{f_t} + 1} \frac{q}{\gamma_I \cdot \alpha_{gR} \cdot S \cdot 2.5}. \quad (18)$$

Glede določanja materialnih karakteristik elementov se bomo oprli na standard EN 1998-3, ki obravnava oceno in prenovo stavb z vidika potresne odpornosti. Skladno s tem standardom so materialne karakteristike, ki jih upoštevamo pri analizah, odvisne od ravni poznavanja konstrukcije. Standard razlikuje tri ravni poznavanja konstrukcije (*KL*), ki se razlikujejo glede na nivo poznavanja podatkov o geometriji objekta, podatkov o detajlih in podatkov o materialih. Za vsako raven poznavanja so predlagani faktorji zaupanja (*CF*), s katerimi se zmanjšujejo materialne karakteristike. Opis posameznih ravni poznavanja s pripadajočimi faktorji zaupanja je podan v preglednici 7. Ker v okviru naloge izvedba preiskav materialnih karakteristik nosilnih elementov ni predvidena, bomo skladno s preglednico 7 upoštevali raven poznavanja konstrukcije *KL 1* in pripadajoč faktor zaupanja $CF = 1.35$. Ob boljšem poznavanju konstrukcije, podkrepjenim s preiskavami, je mogoče upoštevati ustrezno manjše faktorje *CF*. Tu je potrebno še opomniti, da bi bilo ob striktnem upoštevanju standarda EC8-3 poleg faktorjev *CF* potrebno upoštevati še materialne varnostne faktorje γ_M za zidovje, kar pa opustimo, kot je to za zgodovinske objekte predlagano v (Tomaževič, 2009).

Preglednica 7: Ravni poznavanja konstrukcije in faktorji zaupanja (SIST EN 1998-3:2005: str. 19)

Table 7: Knowledge levels of structure and confidence factors (SIST EN 1998-3:2005: p. 19)

Raven poznavanja (<i>KL</i>)	Geometrija	Detajli	Materiali	Faktor zaupanja (<i>CF</i>)
<i>KL 1</i> (omejeno poznavanje)	Iz originalnih načrtov v kombinaciji z omejenim terenskim pregledom ali iz detajlnega terenskega pregleda	Detajli niso znani, povzamemo jih iz prakse in omejenega terenskega pregleda	Mehanske lastnosti privzete iz baze podatkov in omejenega obsega preiskav	1.35
<i>KL 2</i> (običajno poznavanje)	Iz originalnih načrtov v kombinaciji z omejenim terenskim pregledom ali iz detajlnega terenskega pregleda	Detajli iz nepopolnih načrtov in omejenega terenskega pregleda ali razširjenega terenskega pregleda	Mehanske lastnosti iz projektne dokumentacije in omejenega obsega preiskav ali iz razširjenega obsega preiskav	1.2
<i>KL 3</i> (popolno poznavanje)	Iz originalnih načrtov v kombinaciji z omejenim terenskim pregledom ali iz detajlnega terenskega pregleda	Detajli iz podrobnih načrtov in omejenega terenskega pregleda ali detajlnega terenskega pregleda	Mehanske lastnosti iz originalnih poročil o preiskavah in omejenega obsega preiskav ali iz celovitega obsega preiskav	1.0

Materialne karakteristike zidovja bomo privzeli iz baze podatkov o preiskavah zidov dostopnih v strokovni literaturi. V preglednici 8 podajamo materialne karakteristike zidovja povzete po (OPCM 3274, 2003), ki jih bomo uporabljali v analizah. Navedene vrednosti bomo v analizah reducirali s faktorjem zaupanja *CF* ($f_{t,d} = f_t/CF$, $f_{c,d} = f_c/CF$). Pri določitvi tipa zidovja posameznega objekta bomo upoštevali podatke morebitnih že izvedenih preiskav (odstranitev ometa, globinske preiskovalne sonde), v kolikor pa te niso izvedene, bomo na tip zidovja sklepali na podlagi podatkov o obdobju gradnje objekta ter glede na vidne strukture zidov na neometanih delih, kot so neometane fasade, podstreha, notranji zidovi zvonika, ipd. (slike 21, 22 in 23). Pri tem za objekte grajene iz različnih tipov zidovja upoštevamo ocenjen prevladujoči tip zidovja.

Preglednica 8: Materialne karakteristike zidovja privzete v analizi

Table 8: Mechanical parameters for masonry adopted in the analysis

Tip zidovja	Tlačna trdnost f_c [MPa]	Natezna trdnost f_t [MPa]	Elastični modul E [MPa]	Strižni modul G [MPa]
kamnit zid grajen iz neoblikovanega ali delno oblikovanega kamnitega gradiva	0.9	0.05	1050	175
troslojni kamniti zid	1.6	0.08	1440	240
kamnit zid grajen iz klesancev	2.0	0.11	1980	330
opečni zid (polna opeka) običajne kvalitete	1.8	0.09	1800	300
opečni zid (polna opeka) dobre kvalitete	2.8	0.14	2400	400



a) Drežnica - Cerkev sv. Srca Jezusovega. Preiskovalna sonda na zidu (foto: Štampfl, A., 2010).



b) Kanalski Lom - Cerkev sv. Primoža in Felicijana. Preiskovalna sonda na zidu (foto: Popović, M., 2009).



c) Postojna - Cerkev sv. Štefana. Preiskovalna sonda na zidu v območju razpoke (foto: Štampfl, A., 2005).



č) Tolmin - Cerkev sv. Urha. Preiskovalna sonda na zidu (foto: Popović, M., 2009).

Slika 21: Struktura zidov nekaterih cerkva identificirana z izvedbo preiskovalnih sond

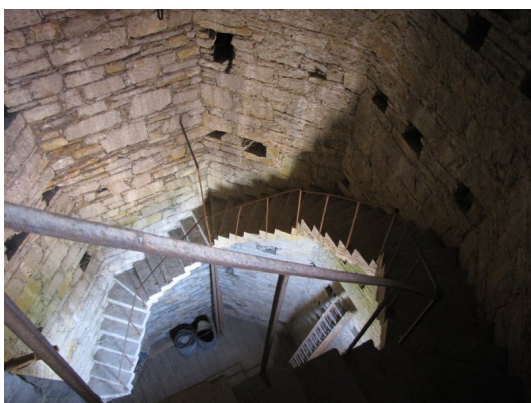
Figure 21: Structure of walls for some churches identified by structural investigations



a) Gornji Grad - Cerkev sv. Mohorja in Fortunata. Struktura zidov v notranjosti zvonika (Bosiljkov, Gostič, 2009).



b) Kočevje - Cerkev sv. Jerneja. Struktura zatrepnega zidu na podstrešju (Bosiljkov, Gostič, 2009).



c) Log pri Vipavi - Cerkev Matere božje Tolažnice žalostnih. Struktura zidov v notranjosti zvonika (Bosiljkov, Gostič, 2009).



č) Nova Štifta - Cerkev Marijinega vnebovzeta. Struktura zidov ob odprtini (Bosiljkov, Gostič, 2009).



d) Murska Sobota - Cerkev sv. Nikolaja. Struktura zidov na podstrešju (Bosiljkov, Gostič, 2009).



e) Ruše - Cerkev Matere božje. Struktura zidov na podstrešju (Bosiljkov, Gostič, 2009).

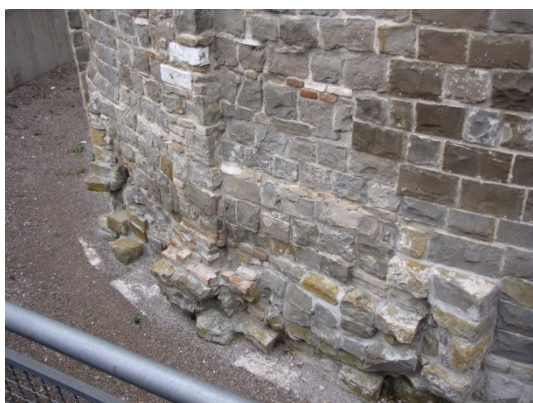
Slika 22: Struktura zidov nekaterih cerkva identificirana na neometanih delih podstrešja in zvonikov
Figure 22: Structure of walls for some churches identified on unplastered parts of attic and bell towers



a) Hrastovlje - Cerkev sv. Trojice. Struktura zidov na neometani fasadi (Bosiljkov, Gostič, 2009).



b) Kočevje - Cerkev sv. Jerneja. Struktura zidov na neometani fasadi (Bosiljkov, Gostič, 2009).



c) Koper - Krstilnica sv. Janeza Krstnika. Struktura zidov na neometani fasadi (Bosiljkov, Gostič, 2009).



č) Slovenske Konjice - Cerkev sv. Jurija. Struktura zidov na neometanem delu fasade ob tlaku (Bosiljkov, Gostič, 2009).



d) Selo na Goričkem - Cerkev sv. Nikolaja. Struktura zidov v območju poškodovanega ometa (Bosiljkov, Gostič, 2009).



e) Suha pri Škofji Loki - Cerkev sv. Janeza Krstnika. Struktura zidov v območju poslikave (Bosiljkov, Gostič, 2009).

Slika 23: Struktura zidov nekaterih cerkva identificirana na neometanih fasadah

Figure 23: Structure of walls for some churches identified on unplastered façades



a) Crngrob - Cerkev Marijinega oznanjenja. Opečni obok (Bosiljkov, Gostič, 2009).



b) Drežnica - Cerkev sv. Srca Jezusovega. Betonski obok (foto: Štampfl, A., 2010).



c) Gornji Grad - Cerkev sv. Mohorja in Fortunata. Opečna kupola (Bosiljkov, Gostič, 2009).



č) Groblje - Cerkev sv. Mohorja in Fortunata. Kamnita kupola (Bosiljkov, Gostič, 2009).



d) Bovec - Cerkev sv. Urha. Lesen raven strop (foto: Popović, M., 2006).



e) Tolmin - Cerkev sv. Urha. Odprto ostrešje (foto: Popović, M., 2009).

Slika 24: Struktura stropov nekaterih cerkva
Figure 24: Structure of ceilings for some churches

4.5.2.5 Indeks potresne ogroženosti

Indeks potresne ogroženosti definiramo kot razmerje med zahtevami potresa oziroma mejnimi vrednostmi indeksov ter posplošeno potresno odpornostjo, ki jo izražajo indeksi γ_1 , γ_2 in γ_3^* :

$$I_{R-\gamma_1,i} = \frac{\gamma_{1,potr}}{\gamma_{1,i}}, \quad (19)$$

$$I_{R-\gamma_2,i} = \frac{\gamma_{2,potr}}{\gamma_{2,i}}, \quad (20)$$

$$I_{R-\gamma_3,i} = \frac{\beta}{\gamma_{3,i}^*} = \frac{1}{\gamma_{3,i}}. \quad (21)$$

Indeks potresne ogroženosti večji od 1.0 pomeni, da je objekt potresno ogrožen. Mejne vrednosti indeksov $\gamma_{1,potr}$ in $\gamma_{2,potr}$ določimo skladno s sliko 20, pri čemer pa v pospešku temeljnih tal upoštevamo tudi faktor pomembnosti γ_I in faktor temeljnih tal S . Pri referenčnem pospešku temeljnih tal $a_{gR} = 0.25$ g, faktorju pomembnosti $\gamma_I = 1.0$ in temeljnimi tlemi tipa A ($S = 1.0$) znašajo mejne vrednosti $\gamma_{1,potr} = 0.1$, $\gamma_{2,potr} = 2.5$ m²/MN in $\beta = 0.417$.

4.5.3 Analiza in rezultati

Izračunali smo indekse γ_1 , γ_2 in γ_3 za 64 obravnavanih objektov. Osnovni vhodni podatki za posamezne objekte so podani v preglednici 9. V nadaljevanju podajamo rezultate za posamezne indekse.

Preglednica 9: Podatki za izračun indeksov

Table 9: Data for calculation of indexes

Št.	Ime enote	S_H [m ²]	$A_{w,x}$ [m ²]	$A_{w,y}$ [m ²]	W [MN]	f/CF [MPa]	f_i/CF [MPa]	E [MPa]	a_{gR} [-]	γ_I [-]	S [-]	q [-]
1	Bled - Blejski grad, kapela sv. Ingenuina in Albuina	57.6	12.0	9.7	4.7	0.119	0.059	1440	0.175	1.2	1.0	1.5
2	Bled - Cerkev Marijinega vnebovzetja	341.5	44.8	33.5	21.4	0.119	0.059	1440	0.175	1.0	1.2	1.5
3	Bohinj - Cerkev sv. Janeza Krstnika	209.4	29.2	15.8	5.8	0.119	0.059	1440	0.200	1.0	1.2	1.5
4	Bovec - Cerkev sv. Urha	497.0	60.9	36.0	24.5	0.119	0.059	1440	0.225	1.2	1.2	1.5
5	Brezje - Cerkev sv. Vida (Marija Pomagaj)	781.8	92.7	78.1	58.2	0.119	0.059	1440	0.200	1.0	1.2	1.5
6	Brežice - Cerkev sv. Roka	352.9	52.2	44.5	21.8	0.119	0.059	1440	0.225	0.8	1.2	1.5
7	Celje - Cerkev sv. Danijela	836.9	107.4	76.9	58.4	0.119	0.059	1440	0.150	1.2	1.2	1.5
8	Crngrob - Cerkev Marijinega oznanjenja	783.7	51.1	31.4	23.1	0.119	0.059	1440	0.225	1.0	1.2	1.5
9	Čezsoča - Cerkev sv. Antona Puščavnika	264.7	34.7	20.2	11.2	0.119	0.059	1440	0.225	0.8	1.0	1.5

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 9

Št.	Ime enote	S_H [m ²]	$A_{w,x}$ [m ²]	$A_{w,y}$ [m ²]	W [MN]	f_c/CF [MPa]	f_t/CF [MPa]	E [MPa]	a_{GR} [-]	γ [-]	S [-]	q [-]
10	Drežnica - Cerkev sv. Srca Jezusovega	658.3	56.8	35.9	30.9	0.119	0.059	1440	0.225	1.2	1.0	1.5
11	Gornji Grad - Cerkev sv. Mohorja in Fortunata	1134.7	163.7	145.8	110.5	0.119	0.059	1440	0.175	1.2	1.2	1.5
12	Groblje - Cerkev sv. Mohorja in Fortunata	307.3	35.8	26.4	9.9	0.119	0.059	1440	0.225	1.0	1.2	1.5
13	Hrastovlje - Cerkev sv. Trojice	100.1	22.9	10.1	3.9	0.148	0.081	1980	0.125	1.2	1.0	1.5
14	Javorca - Spominska cerkev. sv. Duha	163.9	21.8	9.2	2.0	0.119	0.059	1440	0.200	0.8	1.2	1.5
15	Kamnica ob Dravi - Cerkev sv. Martina	473.9	77.9	65.6	34.6	0.119	0.059	1440	0.100	1.0	1.2	1.5
16	Kanalski Lom - Cerkev sv. Primoža in Felicijana	197.7	30.9	11.5	6.3	0.119	0.059	1440	0.200	1.0	1.2	1.5
17	Kobarid - Cerkev sv. Antona Padovanskega	259.2	38.4	19.4	14.5	0.119	0.059	1440	0.225	1.0	1.2	1.5
18	Kočevje - Cerkev sv. Jerneja	995.6	91.6	71.0	70.9	0.148	0.081	1980	0.125	1.2	1.2	1.5
19	Komen - Cerkev Marijinega vnebovzetja	401.0	51.4	26.1	23.3	0.119	0.059	1440	0.150	1.0	1.2	1.5
20	Koper - Cerkev Marijinega vnebovzetja	1722.2	156.8	101.9	106.7	0.119	0.059	1440	0.100	1.2	1.2	1.5
21	Koper - Krstilnica sv. Janeza Krstnika	100.3	12.3	12.3	7.5	0.148	0.081	1980	0.100	1.0	1.2	1.5
22	Krtina pri Domžalah - Cerkev sv. Lenarta in sv. Roka	289.5	28.0	19.6	11.4	0.119	0.059	1440	0.225	0.8	1.2	1.5
23	Laško - Cerkev sv. Martina	697.5	67.9	69.5	38.6	0.119	0.059	1440	0.150	1.2	1.2	1.5
24	Ljubljana - Cerkev Marijinega obiskanja na Rožniku	398.2	66.0	45.7	27.0	0.119	0.059	1440	0.250	0.8	1.2	1.5
25	Ljubljana - Cerkev sv. Florijana	395.8	54.7	49.6	34.1	0.119	0.059	1440	0.250	0.8	1.2	1.5
26	Ljubljana - Cerkev sv. Frančiška Asiškega v Šiški	1829.3	105.2	95.9	43.8	0.002	0.104	2400	0.250	1.2	1.2	1.5
27	Ljubljana - Cerkev sv. Jakoba	1335.0	158.1	203.7	132.9	0.119	0.059	1440	0.250	1.2	1.2	1.5
28	Ljubljana - Cerkev sv. Janeza Krstnika v Trnovem	762.1	102.5	85.4	68.2	0.119	0.059	1440	0.250	1.0	1.2	1.5
29	Ljubljana - Cerkev sv. Nikolaja	1316.9	137.1	162.1	102.7	0.119	0.059	1440	0.250	1.2	1.2	1.5
30	Ljubljana - Cerkev sv. Petra	1241.5	122.6	106.5	68.2	0.119	0.059	1440	0.250	1.2	1.2	1.5
31	Log pri Vipavi - Cerkev Matere božje Tolažnice žalostnih	853.1	104.6	92.5	66.7	0.119	0.059	1440	0.175	0.8	1.2	1.5
32	Maribor - Cerkev sv. Alojzija	583.0	49.1	76.1	42.8	0.119	0.059	1440	0.100	1.2	1.2	1.5
33	Maribor - Cerkev sv. Janeza Krstnika	1330.0	157.3	145.0	96.6	0.119	0.059	1440	0.100	1.2	1.2	1.5
34	Martjanci - Cerkev sv. Martina	197.0	37.2	25.1	11.1	0.119	0.059	1440	0.100	1.2	1.2	1.5
35	Mengore - Cerkev Imena Marijinega	211.5	32.7	11.1	6.6	0.119	0.059	1440	0.200	0.8	1.2	1.5
36	Murska Sobota - Cerkev sv. Nikolaja	943.0	68.9	46.7	30.6	0.002	0.104	2400	0.100	1.2	1.2	1.5
37	Nova Štifta - Cerkev Marijinega vnebovzetja	474.0	79.1	78.0	59.4	0.119	0.059	1440	0.150	1.0	1.2	1.5
38	Olimje - Cerkev Marijinega vnebovzetja	607.0	85.8	81.9	48.4	0.119	0.059	1440	0.150	1.2	1.2	1.5
39	Piran - Cerkev sv. Jurija	885.0	89.6	27.1	36.3	0.119	0.059	1440	0.100	1.0	1.2	1.5
40	Postojna - Cerkev sv. Štefana	527.0	83.1	57.0	46.8	0.119	0.059	1440	0.200	1.2	1.2	1.5
41	Predenca - Cerkev sv. Roka	359.0	60.3	32.3	26.7	0.119	0.059	1440	0.150	0.8	1.2	1.5
42	Ptujska Gora - Cerkev Marije zaščitnice	627.0	73.3	49.7	50.9	0.119	0.059	1440	0.125	1.2	1.2	1.5

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 9

Št.	Ime enote	S_{Hl} [m ²]	$A_{w,x}$ [m ²]	$A_{w,y}$ [m ²]	W [MN]	f_t/CF [MPa]	f_c/CF [MPa]	E [MPa]	a_{gR} [-]	γ [-]	S [-]	q [-]
43	Rogatec - Cerkev sv. Hiacinte	311.0	40.2	24.1	17.5	0.119	0.059	1440	0.150	0.8	1.2	1.5
44	Rogatec - Cerkev sv. Jerneja	449.0	69.4	40.3	35.8	0.119	0.059	1440	0.150	1.2	1.2	1.5
45	Ruše - Cerkev Matere božje	645.0	70.1	67.8	36.7	0.119	0.059	1440	0.100	1.2	1.2	1.5
46	Selo na Goričkem - Cerkev sv. Nikolaja	67.0	11.6	10.3	3.7	0.133	0.067	1800	0.100	1.0	1.2	1.5
47	Sladka Gora - Cerkev Matere božje	568.0	71.4	58.9	34.9	0.119	0.059	1440	0.125	1.2	1.2	1.5
48	Slovenj Gradec - Cerkev sv. Duha	184.0	28.7	24.5	11.7	0.119	0.059	1440	0.100	1.0	1.2	1.5
49	Slovenj Gradec - Cerkev sv. Elizabete	615.0	82.2	63.9	36.4	0.119	0.059	1440	0.100	1.2	1.2	1.5
50	Slovenske Konjice - Cerkev sv. Jurija	643.6	78.4	71.6	38.9	0.119	0.059	1440	0.125	1.0	1.2	1.5
51	Smlednik - Cerkev sv. Urha	861.0	95.3	80.3	59.0	0.119	0.059	1440	0.225	1.2	1.2	1.5
52	Suha pri Škofji Loki - Cerkev sv. Janeza Krstnika	193.0	37.7	25.6	12.6	0.119	0.059	1440	0.225	1.2	1.2	1.5
53	Svete gore - Cerkev Matere božje	507.0	63.0	29.5	23.7	0.119	0.059	1440	0.200	1.2	1.2	1.5
54	Svete gore - Kapela Lurške Matere božje	79.5	16.0	9.5	3.1	0.119	0.059	1440	0.200	0.8	1.2	1.5
55	Svete gore - Kapela sv. Boštjana	60.5	7.4	6.7	2.1	0.119	0.059	1440	0.200	0.8	1.2	1.5
56	Svete gore - Kapela sv. Jurija	44.4	10.4	7.1	1.6	0.119	0.059	1440	0.200	0.8	1.2	1.5
57	Svete gore - Kapela sv. Martina	56.5	10.5	7.0	2.4	0.119	0.059	1440	0.200	0.8	1.2	1.5
58	Šempas - Cerkev sv. Silvestra	409.0	57.9	61.3	47.4	0.119	0.059	1440	0.175	1.2	1.2	1.5
59	Šmartno na Pohorju - Cerkev sv. Martina	413.0	58.5	45.0	18.3	0.119	0.059	1440	0.100	1.2	1.2	1.5
60	Tolmin - Cerkev sv. Urha	199.6	30.5	12.8	6.8	0.119	0.059	1440	0.200	0.8	1.2	1.5
61	Tunjice - Cerkev sv. Ane	446.0	63.1	60.0	39.7	0.119	0.059	1440	0.225	1.0	1.2	1.5
62	Turnišče - Cerkev Marijinega vnebovzetja	301.0	51.4	24.9	15.2	0.119	0.059	1440	0.100	1.2	1.2	1.5
63	Vipava - Cerkev sv. Štefana	513.0	93.5	50.4	41.8	0.119	0.059	1440	0.175	1.2	1.2	1.5
64	Visoko pod Kureščkom - Cerkev sv. Nikolaja	95.9	17.4	9.7	3.2	0.119	0.059	1440	0.200	0.8	1.2	1.5

4.5.3.1 Indeks γ

Rezultati za indekse γ so tabelarično prikazani v preglednici 10 ter grafično na diagramu (slika 27). Že hitri pogled na diagram pokaže, da se vrednosti indeksov posameznih objektov med seboj zelo razlikujejo, kar pomeni, da obravnavamo zelo različne objekte. Vrednosti indeksov se gibljejo od 0.03 do 0.23, povprečna vrednost vseh indeksov pa znaša 0.12. Pri večini objektov je prisotna razlika med vrednostjo indeksov v vzdolžni (x) in prečni (y) smeri. Praviloma so vrednosti za vzdolžno smer večje kot za prečno smer, kar je razumljivo, saj ima večina obravnavanih objektov vzdolžno tlorisno zasnovano.

V nadaljevanju ugotavljamo vpliv tlorisne zasnove na indeks potresne odpornosti (slika 25, slika 27). Ugotovimo lahko, da je za enostavne enoladijske cerkve značilna izrazita razlika med vrednostmi

indeksov v vzdolžni in prečni smeri. Vrednosti indeksov za vzdolžno smer so visoke (povprečna vrednost znaša 0.15), v prečni smeri pa mnogo nižje (povprečna vrednost znaša 0.08). Med temi objekti je tudi objekt z najnižjo vrednostjo indeksa izmed vseh obravnavanih objektov (Piran – Cerkev sv. Jurija, $\gamma_{1,y} = 0.03$). Pri enoladijskih cerkvah z dodanimi (posameznimi) kapelami se razlika med vrednostmi indeksov v posameznih pravokotnih smereh nekoliko zmanjša: povprečna vrednost indeksov v vzdolžnih smereh znaša 0.14, v prečnih smereh pa 0.11. V okviru naloge obravnavamo tudi eno dvoladijsko cerkev (Slovenske Konjice – Cerkev sv. Jurija), ki pa ima vzdolž ladje še dodano veliko kapelo ter zidne opornike po obodu prezbiterja. V konkretnem primeru sta indeksa ($\gamma_{1,x} = 0.12$, $\gamma_{1,y} = 0.11$) primerljiva z indeksi enoladijskih cerkva z dodanimi kapelami. Triladijsko zasnovane cerkve imajo v povprečju najnižje indekse (0.9 v vzdolžni smeri in 0.06 v prečni smeri). To je razumljivo, saj gre običajno za cerkve z velikimi tlorisnimi površinami⁵ in nosilnimi zidovi razporejenimi samo po obodu, stebri, ki potekajo vzdolž glavne ladje, pa se zaradi svoje vitkosti ne upoštevajo kot nosilni elementi pri računu površine zidov. Pri triladijskih cerkvah z dodanimi (posameznimi) kapelami se zmanjša razlika med vzdolžno in prečno smerjo, vrednosti pa so v povprečju višje kot pri triladijskih cerkvah brez dodanih kapel. Povprečne vrednosti indeksov znašajo v vzdolžni smeri 0.11, v prečni smeri pa 0.10. Enoladijske cerkve z bočnimi kapelami so po zasnovi podobne triladijskim, le da so stebri nadomeščeni s prečnimi zidovi, tako da namesto stranskih ladij dobimo niz kapel. Posledično je za te cerkve značilna manjša razlika med indeksi v vzdolžnih in prečnih smereh. Povprečna vrednost indeksov v obeh smereh znaša 0.12. Cerkve z vzdolžno-središčno zasnovijo so nastale s spajanjem vzdolžne in središčne zasnove in so značilne predvsem za obdobje baroka. Vrednosti indeksov so razmeroma visoke ter praviloma večje v vzdolžni smeri. Povprečne vrednosti indeksov za vzdolžno smer znaša 0.14, za prečno smer pa 0.11. Za središčno zasnovane objekte so značilne razmeroma visoke vrednosti indeksov in majhne razlike med indeksi za vzdolžno in prečno smer. Povprečne vrednosti indeksov znašajo v vzdolžni smeri 0.15, v prečni smeri pa 0.14. Za kapele so značilne visoke vrednosti indeksov in velike razlike med indeksi v posameznih smereh. Povprečne vrednosti indeksov znašajo 0.20 v vzdolžni in 0.13 v prečni smeri.

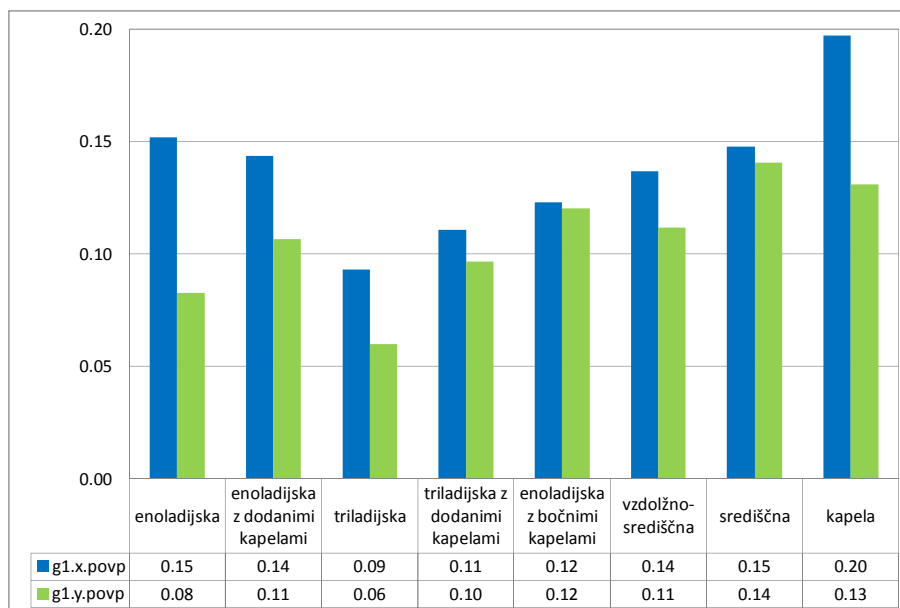
Če za kriterij ranljivosti objekta upoštevamo manjšo izmed vrednosti indeksov γ v posamezni smeri, lahko ugotovimo, da so v povprečju najbolj ranjive (imajo najmanjše indekse potresne odpornosti) triladijske cerkve, sledijo enoladijske, enoladijske in triladijske z dodanimi kapelami ter vzdolžno-središčne, enoladijske z bočnimi kapelami, kapele, najmanj ranjivi pa so središčno zasnovani objekti (slika 25).

⁵ Cerkev sv. Trojice v Hrastovljah smo glede na njeno velikost opredelili kot kapelo, čeprav gre dejansko za triladijsko zasnovijo.

Na enak način lahko po ranljivosti razvrstimo cerkve tudi glede na pripadajoč umetnostni slog. Če izračunamo povprečne vrednosti indeksov za posamezne sloge in za kriterij upoštevamo manjšo izmed vrednosti za vzdolžno in prečno smer, je mogoče sklepati, da so objekti starejših umetnostnih slogov v povprečju manj ranljivi kot objekti novejših slogov. Najmanj so ranljivi objekti romanike, sledijo objekti gotike in baroka, najbolj pa so ranljivi objekti klasicizma in historicizma (slika 26). Vendar pa so te ugotovitve manj zanesljive, kot pri razvrstitvi po tlorisnih tipih, saj so znotraj posameznega sloga lahko zajeti objekti z zelo različnimi tlorisnimi zasnovami. Poleg tega je sama določitev umetnostnega sloga težavna, saj je bilo tekom zgodovine mnogo cerkva predelanih, dograjenih ali stiliziranih, tako da je lahko prisotnih več umetnostnih slogov. V teh primerih upoštevamo prevladujoč slog – predvsem v smislu konstrukcijske zasnove, izrazito predelanih objektov, kjer so npr. gotsko zasnovanemu osnovnemu objektu v baroku dodane kapele ali oboki (npr. Kamnica ob Dravi – Cerkev sv. Jerneja, Ruše - Cerkev Matere božje ali Koper - Cerkev Marijinega vnebovzetja), pa v sklopu analize po slogih ne upoštevamo.

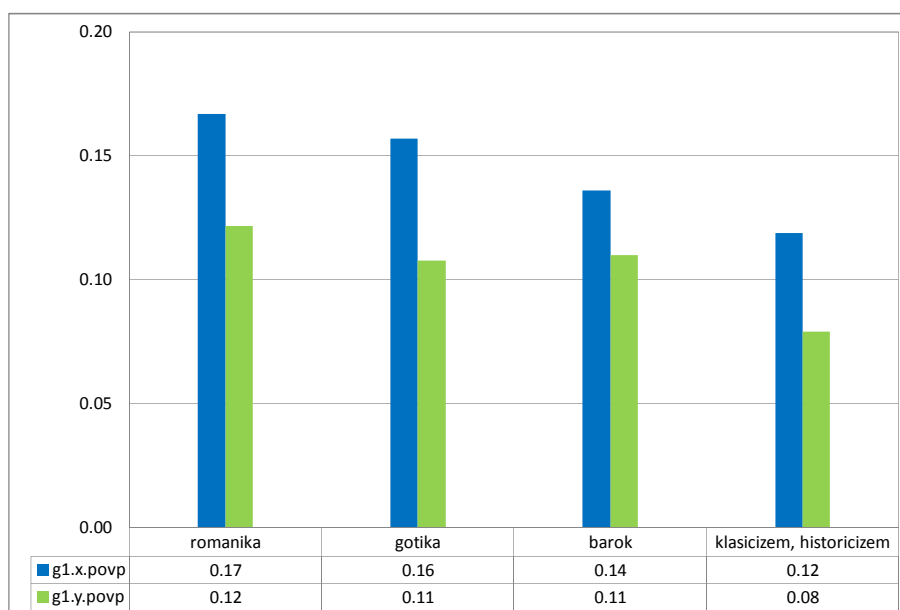
Iz obdobja romanike v Sloveniji nimamo ohranjenih velikih triladijskih cerkva, temveč le manjše vaške cerkvice ali kapele (Zadnikar, 2001). V naboru obravnavanih objektov imamo tako le štiri romanske objekte, od katerih pa so trije po svoji zasnovi kapele ali središčne rotunde z velikim deležem zidov. Od tod izvira visoka povprečna vrednost indeksov za objekte romanike, ki je tako predvsem posledica nabora objektov in ne pravilo. Če primerjamo povprečne vrednosti indeksov za objekte gotike in baroka, ugotovimo, da so vrednosti za prečne smeri pri obeh obdobjih primerljive, je pa pri objektih gotike prisotna večja razlika med indeksi za vzdolžno in prečno smer, kot pri objektih baroka. To je najverjetneje posledica dejstva, da je za barok značilna manjša poudarjenost vzdolžne zasnove kot pri gotiki. Poleg tega so za barok značilne enoladijske cerkve z bočnimi kapelami, vzdolžno-središčne in središčne cerkve, ki imajo zidove razmeroma enakomerno razporejene v vzdolžni in prečni smeri. Da imajo novejši objekti klasicizma in historicizma v povprečju najmanjše indekse deleža zidov, je najverjetneje posledica nabora obravnavanih objektov.

Primerjava indeksov potresne odpornosti z mejnimi vrednostmi pokaže, da je od obravnavanih 64 objektov potresno ogroženih 28 objektov (44 %). Večinoma gre za objekte na območjih z višjo potresno nevarnostjo ($a_{gR} \geq 0.20 g$) (Crngrob - Cerkev Marijinega oznanjenja, Ljubljana - Cerkev sv. Frančiška Asiškega v Šiški, Drežnica – Cerkev sv. Srca Jezusovega), kriterij pa ni izpolnjen tudi za nekatere objekte na območjih nižje potresne nevarnosti ($a_{gR} = 0.10 g$) (npr. Piran - Cerkev sv. Jurija, Koper - Cerkev Marijinega vnebovzetja, Murska Sobota - Cerkev sv. Nikolaja). Vrednosti indeksov potresne odpornosti in potresne ogroženosti so prikazane v preglednici 10.



Slika 25: Povprečni indeksi γ za različne tipe tlorisne zasnove

Figure 25: Average γ indexes for different floor plan types



Slika 26: Povprečni indeksi γ za različne umetnostne sloge

Figure 26: Average γ indexes for different architectural styles

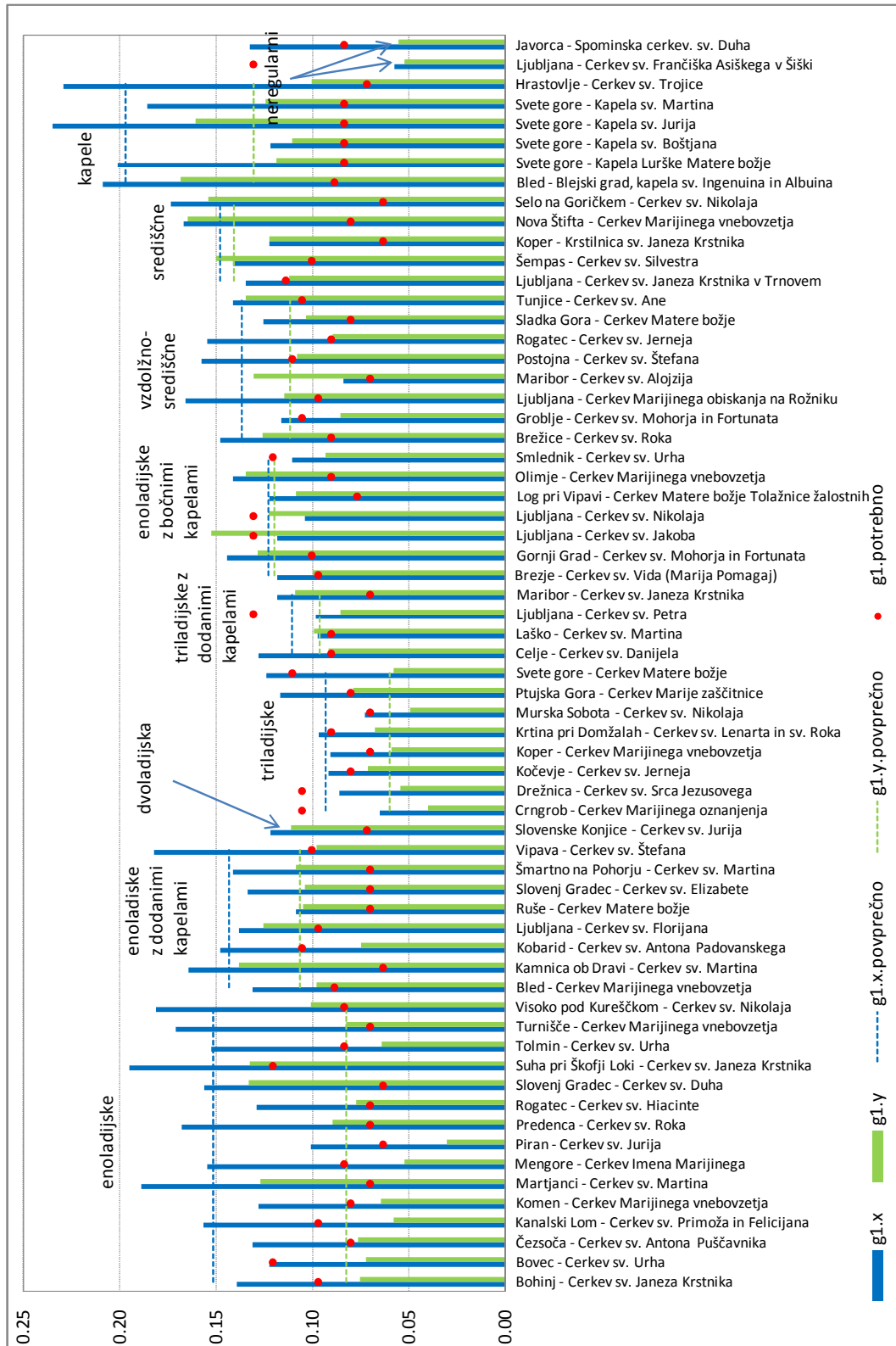
Preglednica 10: Indeksi χ za obe pravokotni smeriTable 10: χ indexes for two orthogonal directions

Št.	Ime enote	χ_x	χ_y	χ_{potr}	$I_{R-\chi_x}$	$I_{R-\chi_y}$
1	Bled - Blejski grad, kapela sv. Ingenuina in Albuina	0.21	0.17	0.09	0.43	0.53
2	Bled - Cerkev Marijinega vnebovzetja	0.13	0.10	0.09	0.68	0.90
3	Bohinj - Cerkev sv. Janeza Krstnika	0.14	0.08	0.10	0.70	1.29
4	Bovec - Cerkev sv. Urha	0.12	0.07	0.12	0.99	1.67
5	Brezje - Cerkev sv. Vida (Marija Pomagaj)	0.12	0.10	0.10	0.82	0.97
6	Brežice - Cerkev sv. Roka	0.15	0.13	0.09	0.61	0.72
7	Celje - Cerkev sv. Danijela	0.13	0.09	0.09	0.71	0.99
8	Crngrob - Cerkev Marijinega oznanjenja	0.07	0.04	0.11	1.62	2.64
9	Čezsoča - Cerkev sv. Antona Puščavnika	0.13	0.08	0.08	0.61	1.05
10	Drežnica - Cerkev sv. Srca Jezusovega	0.09	0.05	0.11	1.22	1.94
11	Gornji Grad - Cerkev sv. Mohorja in Fortunata	0.14	0.13	0.10	0.70	0.78
12	Groblje - Cerkev sv. Mohorja in Fortunata	0.12	0.09	0.11	0.91	1.23
13	Hrastovlje - Cerkev sv. Trojice	0.23	0.10	0.07	0.31	0.72
14	Javorca - Spominska cerkev. sv. Duha	0.13	0.06	0.08	0.63	1.50
15	Kamnica ob Dravi - Cerkev sv. Martina	0.16	0.14	0.06	0.39	0.46
16	Kanalski Lom - Cerkev sv. Primoža in Felicijana	0.16	0.06	0.10	0.62	1.67
17	Kobarid - Cerkev sv. Antona Padovanskega	0.15	0.07	0.11	0.71	1.41
18	Kočevje - Cerkev sv. Jerneja	0.09	0.07	0.08	0.87	1.13
19	Komen - Cerkev Marijinega vnebovzetja	0.13	0.07	0.08	0.63	1.24
20	Koper - Cerkev Marijinega vnebovzetja	0.09	0.06	0.07	0.77	1.19
21	Koper - Krstilnica sv. Janeza Krstnika	0.12	0.12	0.06	0.52	0.52
22	Krtina pri Domžalah - Cerkev sv. Lenarta in sv. Roka	0.10	0.07	0.09	0.93	1.34
23	Laško - Cerkev sv. Martina	0.10	0.10	0.09	0.93	0.91
24	Ljubljana - Cerkev Marijinega obiskanja na Rožniku	0.17	0.11	0.10	0.59	0.85
25	Ljubljana - Cerkev sv. Florijana	0.14	0.13	0.10	0.70	0.78
26	Ljubljana - Cerkev sv. Frančiška Asiškega v Šiški	0.06	0.05	0.13	2.27	2.49
27	Ljubljana - Cerkev sv. Jakoba	0.12	0.15	0.13	1.10	0.86
28	Ljubljana - Cerkev sv. Janeza Krstnika v Trnovem	0.13	0.11	0.11	0.85	1.02
29	Ljubljana - Cerkev sv. Nikolaja	0.10	0.12	0.13	1.26	1.06
30	Ljubljana - Cerkev sv. Petra	0.10	0.09	0.13	1.32	1.52
31	Log pri Vipavi - Cerkev Matere božje Tolažnice žalostnih	0.12	0.11	0.08	0.63	0.71
32	Maribor - Cerkev sv. Alojzija	0.08	0.13	0.07	0.84	0.54
33	Maribor - Cerkev sv. Janeza Krstnika	0.12	0.11	0.07	0.59	0.65
34	Martjanci - Cerkev sv. Martina	0.19	0.13	0.07	0.37	0.55
35	Mengore - Cerkev Imena Marijinega	0.15	0.05	0.08	0.54	1.60
36	Murska Sobota - Cerkev sv. Nikolaja	0.07	0.05	0.07	0.96	1.42
37	Nova Štifta - Cerkev Marijinega vnebovzetja	0.17	0.16	0.08	0.48	0.49
38	Olimje - Cerkev Marijinega vnebovzetja	0.14	0.13	0.09	0.64	0.67
39	Piran - Cerkev sv. Jurija	0.10	0.03	0.06	0.63	2.08
40	Postojna - Cerkev sv. Štefana	0.16	0.11	0.11	0.70	1.02
41	Predenca - Cerkev sv. Roka	0.17	0.09	0.07	0.42	0.78
42	Ptujska Gora - Cerkev Marije zaščitnice	0.12	0.08	0.08	0.69	1.01
43	Rogatec - Cerkev sv. Hiacinte	0.13	0.08	0.07	0.54	0.91
44	Rogatec - Cerkev sv. Jerneja	0.15	0.09	0.09	0.59	1.01
45	Ruše - Cerkev Matere božje	0.11	0.11	0.07	0.65	0.67
46	Selo na Goričkem - Cerkev sv. Nikolaja	0.17	0.15	0.06	0.37	0.41
47	Sladka Gora - Cerkev Matere božje	0.13	0.10	0.08	0.64	0.77
48	Slovenj Gradec - Cerkev sv. Duha	0.16	0.13	0.06	0.41	0.48
49	Slovenj Gradec - Cerkev sv. Elizabete	0.13	0.10	0.07	0.53	0.68
50	Slovenske Konjice - Cerkev sv. Jurija	0.12	0.11	0.07	0.59	0.65

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 10

Št.	Ime enote	χ_x	χ_y	χ_{potr}	$I_{R-\chi_x}$	$I_{R-\chi_y}$
51	Smladnik - Cerkev sv. Urha	0.11	0.09	0.12	1.09	1.29
52	Suha pri Škofji Loki - Cerkev sv. Janeza Krstnika	0.20	0.13	0.12	0.62	0.91
53	Svete gore - Cerkev Matere božje	0.12	0.06	0.11	0.89	1.90
54	Svete gore - Kapela Lurške Matere božje	0.20	0.12	0.08	0.42	0.70
55	Svete gore - Kapela sv. Boštjana	0.12	0.11	0.08	0.69	0.76
56	Svete gore - Kapela sv. Jurija	0.23	0.16	0.08	0.36	0.52
57	Svete gore - Kapela sv. Martina	0.19	0.12	0.08	0.45	0.67
58	Šempas - Cerkev sv. Silvestra	0.14	0.15	0.10	0.71	0.67
59	Šmartno na Pohorju - Cerkev sv. Martina	0.14	0.11	0.07	0.50	0.65
60	Tolmin - Cerkev sv. Urha	0.15	0.06	0.08	0.55	1.31
61	Tunjice - Cerkev sv. Ane	0.14	0.13	0.11	0.75	0.78
62	Turnišče - Cerkev Marijinega vnebovzetja	0.17	0.08	0.07	0.41	0.85
63	Vipava - Cerkev sv. Štefana	0.18	0.10	0.10	0.55	1.02
64	Visoko pod Kureščkom - Cerkev sv. Nikolaja	0.18	0.10	0.08	0.46	0.83



Slika 27: Indeksi χ^2 za obe pravokotni smeri

Figure 27: χ^2 indexes for two orthogonal directions

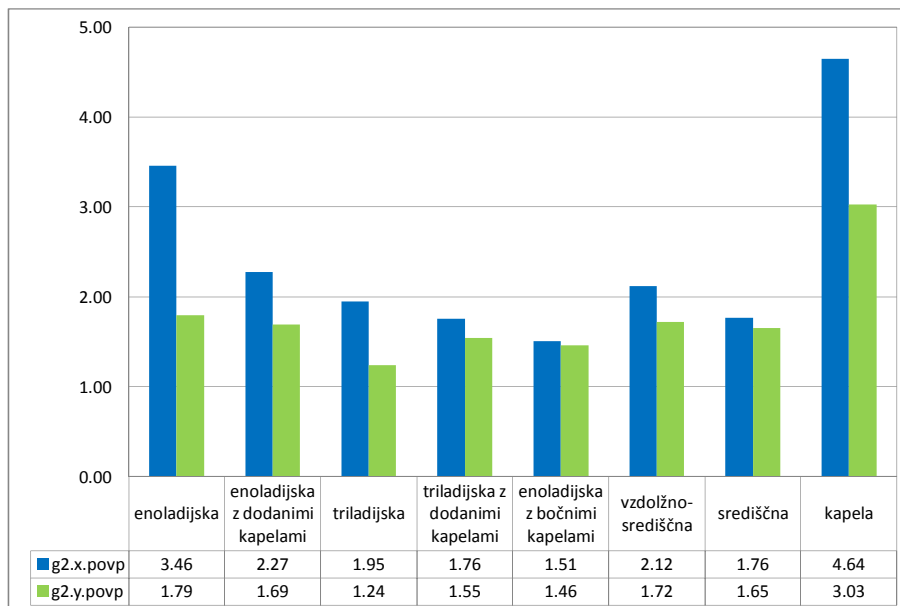
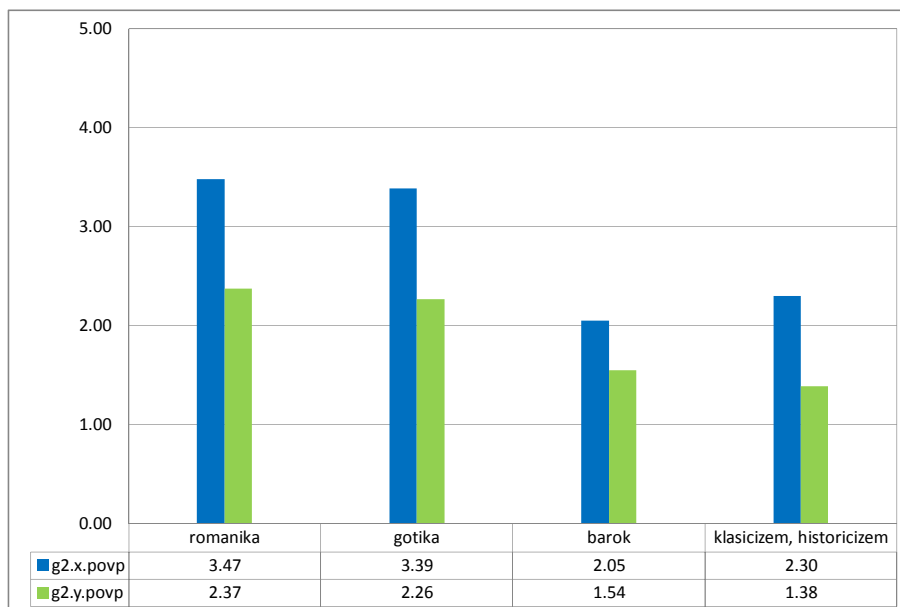
4.5.3.2 Indeks γ_2

Tudi pri indeksu γ_2 veljajo enake ugotovitve glede razlik med indeksi v eni in drugi smeri kot pri indeksu γ_1 . Večinoma so vrednosti indeksov v prečnih smereh objektov znatno manjše kot v vzdolžnih smereh. Najmanjšo vrednost indeksa γ_2 dosega Cerkev sv. Jurija v Piranu v prečni smeri ($\gamma_{2,y} = 0.75 \text{ m}^2/\text{MN}$), kar je predvsem posledica majhne površine zidov v prečni smeri, največjo vrednost pa dosega Spominska cerkev sv. Duha na Javorci v vzdolžni smeri ($\gamma_{2,x} = 10.67 \text{ m}^2/\text{MN}$), kar je posledica majhne teže objekta, saj je večji del konstrukcije v leseni izvedbi. Povprečna vrednost vseh indeksov znaša $2.25 \text{ m}^2/\text{MN}$. Rezultati so grafično prikazani na diagramu (slika 30) ter tabelarično v preglednici 11.

Če primerjamo povprečne vrednosti indeksov γ_2 po posameznih tlorisnih tipih, ugotovimo, da so razlike med posameznimi tlorisnimi tipi bistveno manjše kot pri indeksu γ_1 . Izstopajo predvsem kapele in enoladijske cerkve, pri ostalih tipih pa so razlike med povprečnimi vrednostmi manjše. Razvrstitev tlorisnih tipov po minimalnih povprečnih indeksih pokaže, da je vrstni red nekoliko drugačen kot pri indeksu γ_1 . Tudi tu so najbolj ranljive triladijske cerkve, sledijo enoladijske z bočnimi kapelami in triladijske z dodanimi kapelami, enoladijske z dodanimi kapelami, središčne in vzdolžno-središčne, potem so enoladijske, najmanj ranljive pa so kapele (slika 28).

Primerjava povprečnih indeksov po posameznih umetnostnih slogih pokaže podoben trend kot pri indeksu γ_1 : objekti starejših umetnostnih slogov so v povprečju manj ranljivi kot objekti novejših slogov (slika 29). Komentar glede objektov romanike in objektov klasicizma in historicizma je enak kot pri indeksu γ_1 , so pa tu prisotne večje razlike med objekti gotike in baroka. Da so indeksi γ_2 pri objektih baroka v povprečju nižji od objektov gotike si lahko razlagamo z domnevo, da se pri objektih baroka zaradi večje poudarjenosti osrednjega prostora povečujejo razponi obokov in kupol, s tem pa tudi njihova debelina in posledično teža. Da ta predpostavka ne more biti splošno veljavna hitro pokaže primer triladijskih cerkva. Za gotiko značilna triladijska zasnova se v baroku preoblikuje v enoladijsko z bočnimi kapelami, ki ima sicer podobne razpone obokov, vendar bistveno večji delež prečnih zidov in posledično višji indeks (prim. Ptujška Gora – cerkev Marije zaščitnice in Ljubljana – cerkev sv. Nikolaja). Za bolj oprijemljive zaključke bi morali med seboj primerjati le objekte znotraj primerljivih tlorisnih tipov, za kar pa bi potrebovali večji nabor objektov.

Primerjava indeksov z mejnimi vrednostmi pokaže, da je od obravnavanih 64 objektov potresno ogroženih 46 objektov (72 %).

Slika 28: Povprečni indeksi γ [m^2/MN] za različne tipe tlorisne zasnoveFigure 28: Average γ indexes [m^2/MN] for different floor plan typesSlika 29: Povprečni indeksi γ [m^2/MN] za različne umetnostne slogeFigure 29: Average γ indexes [m^2/MN] for different architectural styles

Preglednica 11: Indeksi γ za obe pravokotni smeri

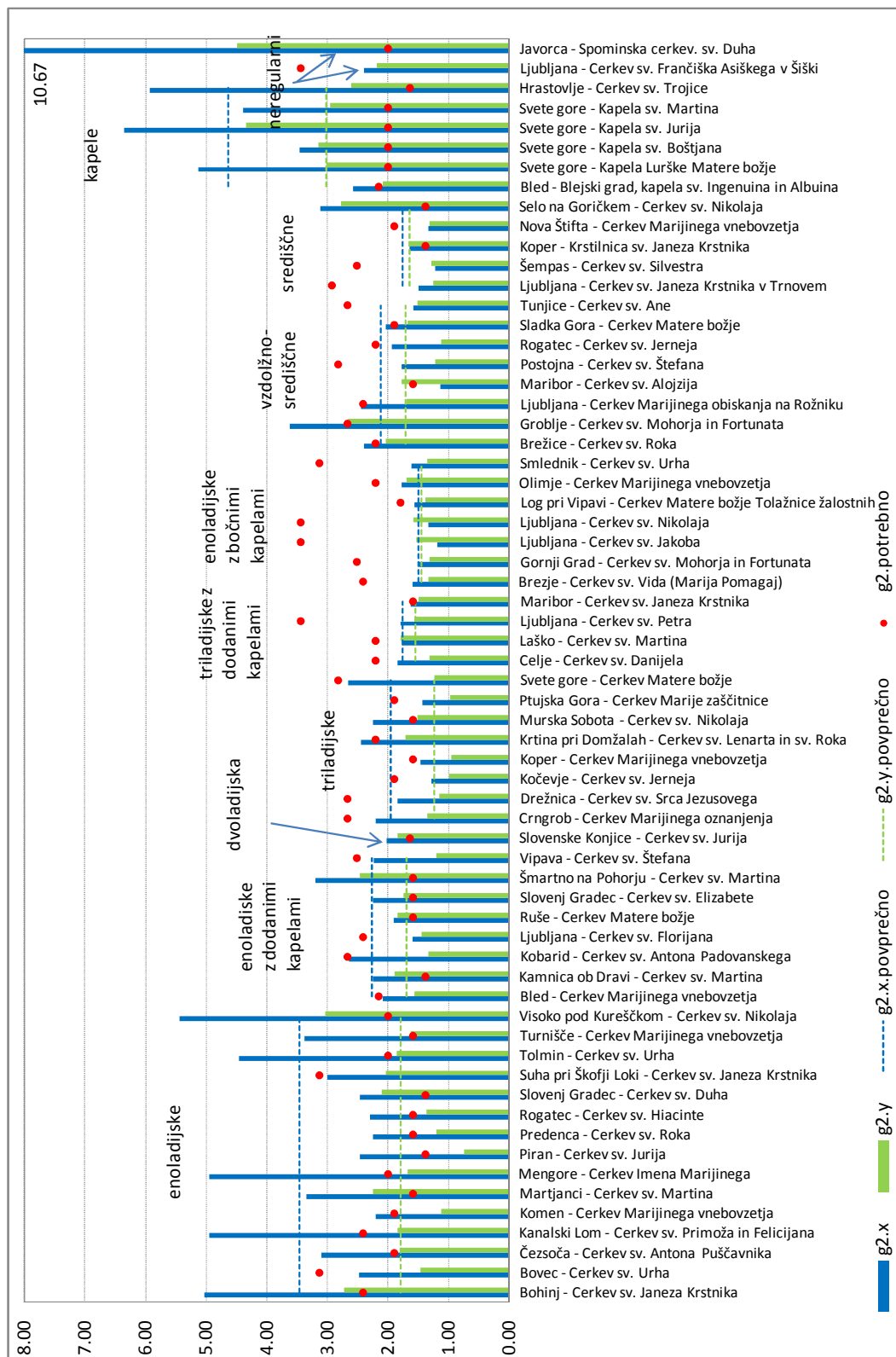
Table 11: γ indexes for two orthogonal directions

Št.	Ime enote	γ_x [m2/MN]	γ_y [m2/MN]	γ_{potr} [m2/MN]	$I_{R-\gamma_x}$	$I_{R-\gamma_y}$
1	Bled - Blejski grad, kapela sv. Ingenuina in Albuina	2.58	2.09	2.16	0.83	1.03
2	Bled - Cerkev Marijinega vnebovzetja	2.09	1.57	2.16	1.03	1.38
3	Bohinj - Cerkev sv. Janeza Krstnika	5.04	2.73	2.41	0.48	0.88
4	Bovec - Cerkev sv. Urha	2.49	1.47	3.13	1.26	2.13
5	Brezje - Cerkev sv. Vida (Marija Pomagaj)	1.59	1.34	2.41	1.52	1.80
6	Brežice - Cerkev sv. Roka	2.39	2.04	2.21	0.92	1.08
7	Celje - Cerkev sv. Danijela	1.84	1.32	2.21	1.20	1.68
8	Crngrob - Cerkev Marijinega oznanjenja	2.21	1.36	2.67	1.21	1.97
9	Čezsoča - Cerkev sv. Antona Puščavnika	3.11	1.81	1.90	0.61	1.05
10	Drežnica - Cerkev sv. Srca Jezusovega	1.84	1.16	2.67	1.45	2.30
11	Gornji Grad - Cerkev sv. Mohorja in Fortunata	1.48	1.32	2.52	1.70	1.91
12	Groblje - Cerkev sv. Mohorja in Fortunata	3.62	2.67	2.67	0.74	1.00
13	Hrastovlje - Cerkev sv. Trojice	5.94	2.61	1.64	0.28	0.63
14	Javorca - Spominska cerkev. sv. Duha	10.67	4.49	2.00	0.19	0.45
15	Kamnica ob Dravi - Cerkev sv. Martina	2.25	1.90	1.39	0.62	0.73
16	Kanalski Lom - Cerkev sv. Primoža in Felicijana	4.95	1.84	2.41	0.49	1.31
17	Kobarid - Cerkev sv. Antona Padovanskega	2.64	1.34	2.67	1.01	2.00
18	Kočevje - Cerkev sv. Jerneja	1.29	1.00	1.90	1.47	1.90
19	Komen - Cerkev Marijinega vnebovzetja	2.21	1.12	1.90	0.86	1.70
20	Koper - Cerkev Marijinega vnebovzetja	1.47	0.95	1.59	1.08	1.67
21	Koper - Krstilnica sv. Janeza Krstnika	1.65	1.65	1.39	0.84	0.84
22	Krtina pri Domžalah - Cerkev sv. Lenarta in sv. Roka	2.45	1.72	2.21	0.90	1.29
23	Laško - Cerkev sv. Martina	1.76	1.80	2.21	1.25	1.22
24	Ljubljana - Cerkev Marijinega obiskanja na Rožniku	2.45	1.69	2.41	0.99	1.42
25	Ljubljana - Cerkev sv. Florijana	1.61	1.46	2.41	1.50	1.66
26	Ljubljana - Cerkev sv. Frančiška Asiškega v Šiški	2.40	2.19	3.44	1.43	1.57
27	Ljubljana - Cerkev sv. Jakoba	1.19	1.53	3.44	2.89	2.25
28	Ljubljana - Cerkev sv. Janeza Krstnika v Trnovem	1.50	1.25	2.93	1.95	2.34
29	Ljubljana - Cerkev sv. Nikolaja	1.33	1.58	3.44	2.58	2.18
30	Ljubljana - Cerkev sv. Petra	1.80	1.56	3.44	1.92	2.21
31	Log pri Vipavi - Cerkev Matere božje Tolažnice žalostnih	1.57	1.39	1.80	1.15	1.30
32	Maribor - Cerkev sv. Alojzija	1.15	1.78	1.59	1.39	0.89
33	Maribor - Cerkev sv. Janeza Krstnika	1.63	1.50	1.59	0.98	1.06
34	Martjanci - Cerkev sv. Martina	3.35	2.26	1.59	0.47	0.71
35	Mengore - Cerkev Imena Marijinega	4.94	1.67	2.00	0.41	1.20
36	Murska Sobota - Cerkev sv. Nikolaja	2.25	1.53	1.59	0.71	1.04
37	Nova Štifta - Cerkev Marijinega vnebovzetja	1.33	1.31	1.90	1.43	1.45
38	Olimje - Cerkev Marijinega vnebovzetja	1.77	1.69	2.21	1.25	1.31
39	Piran - Cerkev sv. Jurija	2.47	0.75	1.39	0.56	1.85
40	Postojna - Cerkev sv. Štefana	1.78	1.22	2.83	1.59	2.32
41	Predenca - Cerkev sv. Roka	2.26	1.21	1.59	0.70	1.31
42	Ptujska Gora - Cerkev Marije zaščitnice	1.44	0.98	1.90	1.32	1.94
43	Rogatec - Cerkev sv. Hiacinte	2.30	1.38	1.59	0.69	1.16
44	Rogatec - Cerkev sv. Jerneja	1.94	1.13	2.21	1.14	1.96
45	Ruše - Cerkev Matere božje	1.91	1.85	1.59	0.83	0.86
46	Selo na Goričkem - Cerkev sv. Nikolaja	3.12	2.77	1.39	0.44	0.50
47	Sladka Gora - Cerkev Matere božje	2.04	1.69	1.90	0.93	1.13
48	Slovenj Gradec - Cerkev sv. Duha	2.46	2.10	1.39	0.56	0.66
49	Slovenj Gradec - Cerkev sv. Elizabete	2.26	1.75	1.59	0.71	0.91

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 11

Št.	Ime enote	γ_x [m ² /MN]	γ_y [m ² /MN]	γ_{potr} [m ² /MN]	$I_{R-\gamma_x}$	$I_{R-\gamma_y}$
50	Slovenske Konjice - Cerkev sv. Jurija	2.02	1.84	1.64	0.81	0.89
51	Smlednik - Cerkev sv. Urha	1.62	1.36	3.13	1.94	2.30
52	Suha pri Škofji Loki - Cerkev sv. Janeza Krstnika	3.00	2.04	3.13	1.04	1.54
53	Svete gore - Cerkev Matere božje	2.66	1.25	2.83	1.06	2.27
54	Svete gore - Kapela Lurške Matere božje	5.13	3.03	2.00	0.39	0.66
55	Svete gore - Kapela sv. Boštjana	3.46	3.14	2.00	0.58	0.64
56	Svete gore - Kapela sv. Jurija	6.36	4.35	2.00	0.31	0.46
57	Svete gore - Kapela sv. Martina	4.40	2.95	2.00	0.46	0.68
58	Šempas - Cerkev sv. Silvestra	1.22	1.29	2.52	2.06	1.95
59	Šmartno na Pohorju - Cerkev sv. Martina	3.20	2.46	1.59	0.50	0.65
60	Tolmin - Cerkev sv. Urha	4.46	1.87	2.00	0.45	1.07
61	Tunjice - Cerkev sv. Ane	1.59	1.51	2.67	1.68	1.77
62	Turnišče - Cerkev Marijinega vnebovzetja	3.38	1.64	1.59	0.47	0.97
63	Vipava - Cerkev sv. Štefana	2.24	1.21	2.52	1.12	2.09
64	Visoko pod Kureščkom - Cerkev sv. Nikolaja	5.45	3.04	2.00	0.37	0.66



Slika 30: Indeksi γ [m²/MN] za obe pravokotni smeri
Figure 30: γ indexes [m²/MN] for two orthogonal directions

4.5.3.3 Indeks γ_3

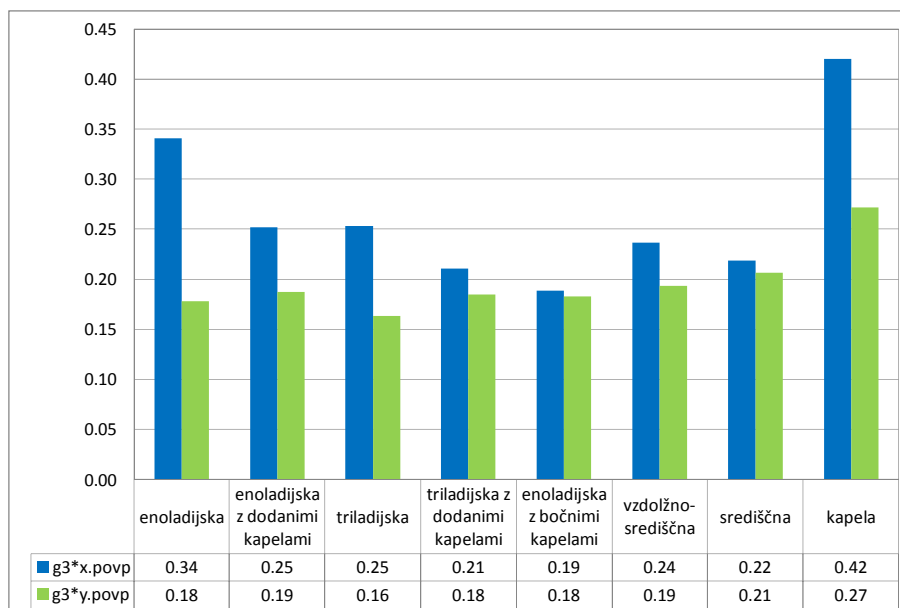
Indeks γ_3 predstavlja razmerje med ocenjeno potresno odpornostjo objekta in ocenjeno potresno obremenitvijo (prečno silo ob vpetju) ter tako že odraža potresno ogroženost. Po analogiji s prvima dvema indeksoma samo potresno odpornost izraža indeks γ_3^* (10), mejno oziroma potrebno vrednost $\gamma_{3,potr}$ izraža faktor seizmičnosti β (14), γ_3 pa predstavlja indeks potresne varnosti, ki je obratno sorazmeren z indeksom potresne ogroženosti.

Vrednosti indeksa γ_3^* , ki dejansko izražajo koeficiente strižne odpornosti, znašajo od 0.15 do 0.75 za vzdolžne smeri in od 0.09 do 0.34 za prečne smeri objektov. Veljajo enake ugotovitve glede razlik med indeksi v eni in drugi smeri kot pri prvih dveh indeksih. Tudi tu najmanjšo vrednost indeksa dosega Cerkev sv. Jurija v Piranu ($\gamma_{3,y}^* = 0.09$), največjo vrednost pa dosega lesena Spominska cerkev sv. Duha na Javorci ($\gamma_{3,x}^* = 0.75$). Povprečna vrednost vseh indeksov znaša 0.24. Rezultati so grafično prikazani na diagramu (slika 33) ter tabelarično v preglednici 12.

Povprečne vrednosti indeksov γ_3^* za posamezne tlorisne tipe kažejo majhno odvisnost potresne odpornosti od tlorisnega tipa, predvsem, če kot merodajno upoštevamo prečno smer objekta. Razlike med posameznimi tipi so manjše kot pri ostalih dveh indeksih. Tudi tu najmanjše vrednosti v povprečju dosega triladijske cerkve, sledijo pa z minimalnimi razlikami enoladijske, triladijske z dodanimi kapelami, enoladijske z dodanimi kapelami in enoladijske z bočnimi kapelami, nato vzdolžno-središčne in središčne, najmanj ranljive pa so kapele (slika 31).

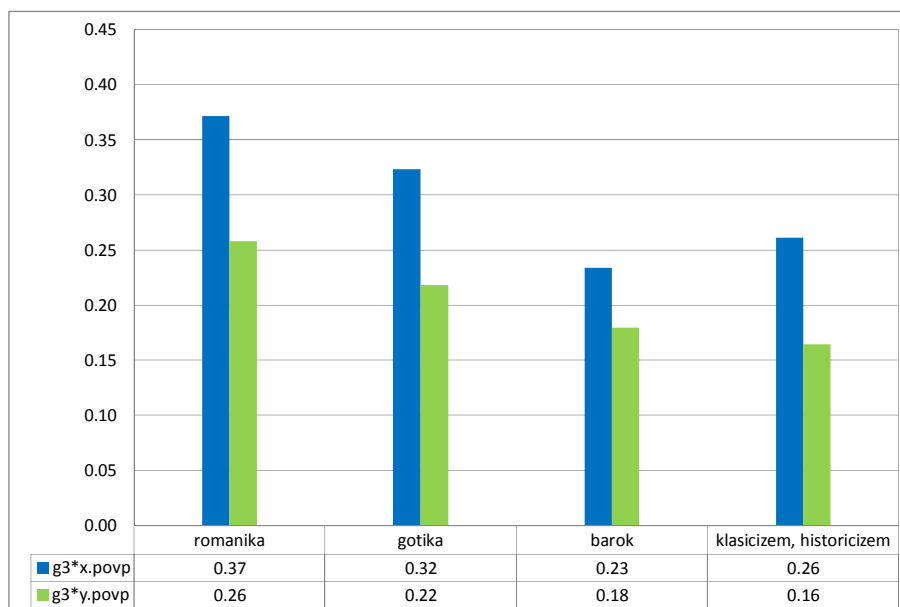
Primerjava povprečnih indeksov po posameznih umetnostnih slogih pokaže podoben trend kot pri prejšnjih dveh indeksih: objekti starejših umetnostnih slogov so v povprečju manj ranljivi kot objekti novejših slogov (slika 32), vendar pa te ugotovitve zaradi omejenega nabora objektov in raznolikosti tlorisnih zasnov ne smemo razumeti kot splošno veljavne.

Sedaj si oglejmo še vrednosti indeksov potresne ogroženosti I_R (preglednica 12). Vrednosti indeksov znašajo v vzdolžnih smereh od 0.40 do 3.88, v prečnih smereh pa od 0.7 do 3.44. Povprečna vrednost večjih izmed indeksov za vzdolžno in prečno smer znaša 1.95, kar pomeni, da so za obravnavane cerkve potresne zahteve v povprečju za 95 % večje od potresne odpornosti. Najvišjo vrednost indeksa potresne ogroženosti dosega Cerkev sv. Jakoba v Ljubljani ($I_R = 3.88$), najnižjo pa Cerkev sv. Nikolaja v Selu na Goričkem ($I_R = 0.70$). Pri tem je kar 89 % obravnavanih objektov potresno ogroženih. Vzrok za tako nizke vrednosti indeksov potresne odpornosti in posledično velik delež potresno ogroženih objektov gre iskati predvsem v strogih zahtevanih mejnih vrednostih. Predpostavili smo namreč maksimalno vrednost v spektru odziva, minimalen faktor redukcije potresnih sil ter še dodatni faktor pomembnosti. V nadaljevanju bomo preverili veljavnost indeksov z računsko analizo.



Slika 31: Povprečni indeksi γ_3^* za različne tipe tlorisne zasnove

Figure 31: Average γ_3^* indexes for different floor plan types



Slika 32: Povprečni indeksi γ_3^* za različne umetnostne sloge

Figure 32: Average γ_3^* indexes for different architectural styles

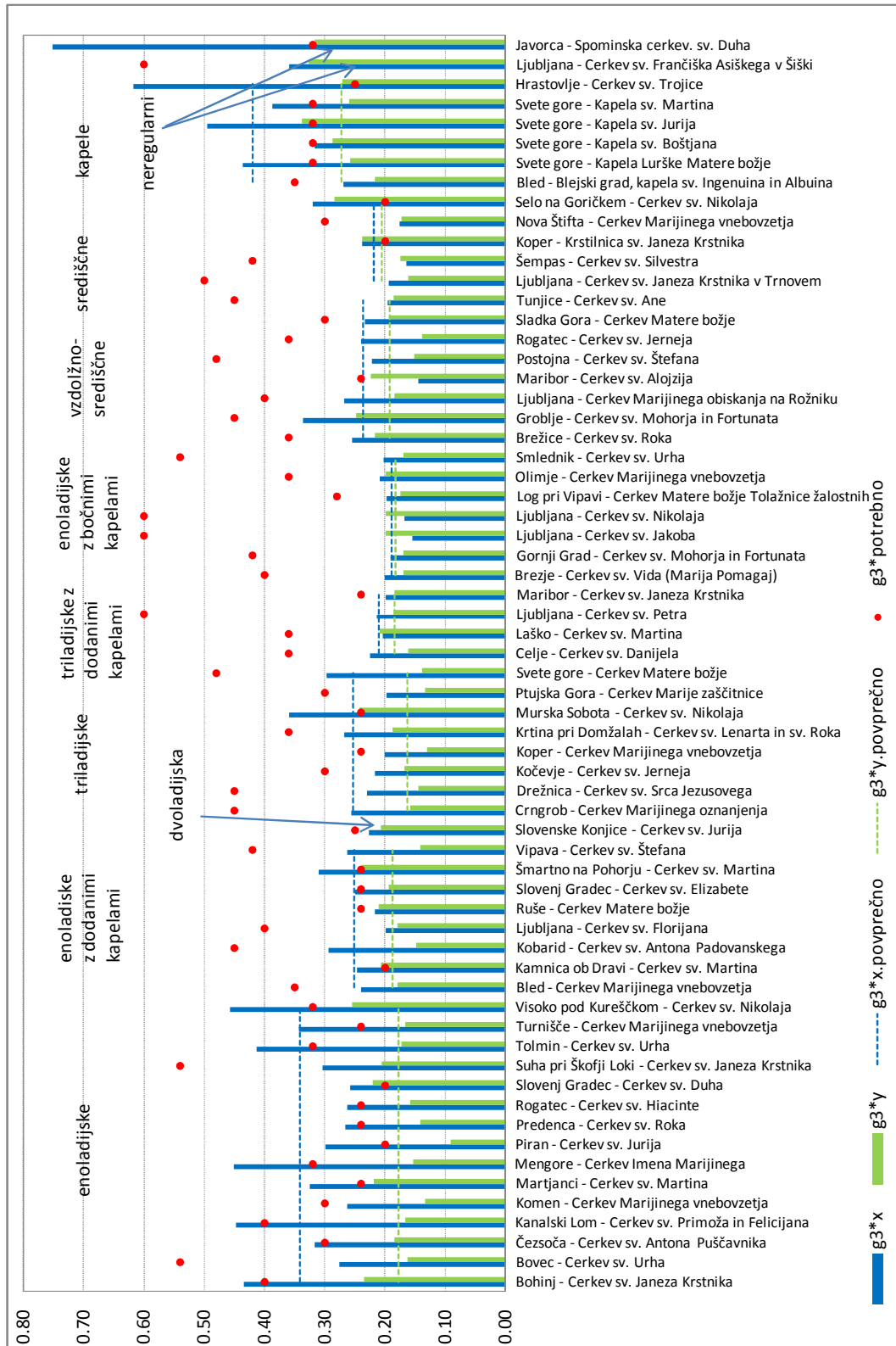
Preglednica 12: Indeksi γ za obe pravokotni smeriTable 12: γ indexes for two orthogonal directions

Št.	Ime enote	γ_x^*	γ_y^*	β	$\gamma_{x,x}$	$\gamma_{y,y}$	$I_{R-\beta,x}$	$I_{R-\beta,y}$
1	Bled - Blejski grad, kapela sv. Ingenuina in Albuina	0.27	0.22	0.35	0.77	0.62	1.30	1.61
2	Bled - Cerkev Marijinega vnebovzetja	0.24	0.18	0.35	0.69	0.51	1.46	1.95
3	Bohinj - Cerkev sv. Janeza Krstnika	0.44	0.24	0.40	1.09	0.59	0.92	1.70
4	Bovec - Cerkev sv. Urha	0.28	0.16	0.54	0.51	0.30	1.95	3.30
5	Brezje - Cerkev sv. Vida (Marija Pomagaj)	0.20	0.17	0.40	0.50	0.42	1.99	2.37
6	Brežice - Cerkev sv. Roka	0.25	0.22	0.36	0.71	0.60	1.41	1.66
7	Celje - Cerkev sv. Danijela	0.22	0.16	0.36	0.62	0.45	1.60	2.24
8	Crngrob - Cerkev Marijinega oznanjenja	0.26	0.16	0.45	0.57	0.35	1.75	2.85
9	Čezsoča - Cerkev sv. Antona Puščavnika	0.32	0.18	0.30	1.06	0.62	0.95	1.62
10	Drežnica - Cerkev sv. Srca Jezusovega	0.23	0.14	0.45	0.51	0.32	1.96	3.10
11	Gornji Grad - Cerkev sv. Mohorja in Fortunata	0.19	0.17	0.42	0.45	0.40	2.21	2.48
12	Groblje - Cerkev sv. Mohorja in Fortunata	0.34	0.25	0.45	0.75	0.55	1.34	1.81
13	Hrastovlje - Cerkev sv. Trojice	0.62	0.27	0.25	2.47	1.09	0.40	0.92
14	Javorca - Spominska cerkev. sv. Duha	0.75	0.32	0.32	2.35	0.99	0.43	1.01
15	Kamnica ob Dravi - Cerkev sv. Martina	0.25	0.21	0.20	1.23	1.04	0.81	0.97
16	Kanalski Lom - Cerkev sv. Primoža in Felicijana	0.45	0.17	0.40	1.12	0.42	0.89	2.40
17	Kobarid - Cerkev sv. Antona Padovanskega	0.29	0.15	0.45	0.65	0.33	1.53	3.03
18	Kočevje - Cerkev sv. Jerneja	0.22	0.17	0.30	0.72	0.56	1.38	1.78
19	Komen - Cerkev Marijinega vnebovzetja	0.26	0.13	0.30	0.88	0.45	1.14	2.24
20	Koper - Cerkev Marijinega vnebovzetja	0.20	0.13	0.24	0.84	0.54	1.19	1.84
21	Koper - Krstilnica sv. Janeza Krstnika	0.24	0.24	0.20	1.19	1.19	0.84	0.84
22	Krtina pri Domžalah - Cerkev sv. Lenarta in sv. Roka	0.27	0.19	0.36	0.74	0.52	1.35	1.93
23	Laško - Cerkev sv. Martina	0.20	0.21	0.36	0.57	0.58	1.76	1.72
24	Ljubljana - Cerkev Marijinega obiskanja na Rožniku	0.27	0.19	0.40	0.67	0.46	1.50	2.16
25	Ljubljana - Cerkev sv. Florijana	0.20	0.18	0.40	0.50	0.45	2.01	2.22
26	Ljubljana - Cerkev sv. Frančiška Asiškega v Šiški	0.36	0.33	0.60	0.60	0.55	1.67	1.83
27	Ljubljana - Cerkev sv. Jakoba	0.15	0.20	0.60	0.26	0.33	3.88	3.01
28	Ljubljana - Cerkev sv. Janeza Krstnika v Trnovem	0.19	0.16	0.50	0.39	0.32	2.57	3.09
29	Ljubljana - Cerkev sv. Nikolaja	0.17	0.20	0.60	0.28	0.33	3.56	3.01
30	Ljubljana - Cerkev sv. Petra	0.21	0.19	0.60	0.36	0.31	2.81	3.23
31	Log pri Vipavi - Cerkev Matere božje Tolažnice žalostnih	0.20	0.17	0.28	0.70	0.62	1.42	1.61
32	Maribor - Cerkev sv. Alojzija	0.14	0.22	0.24	0.60	0.94	1.66	1.07
33	Maribor - Cerkev sv. Janeza Krstnika	0.20	0.18	0.24	0.83	0.77	1.20	1.30
34	Martjanci - Cerkev sv. Martina	0.33	0.22	0.24	1.36	0.91	0.74	1.10
35	Mengore - Cerkev Imena Marijinega	0.45	0.15	0.32	1.41	0.48	0.71	2.09
36	Murska Sobota - Cerkev sv. Nikolaja	0.36	0.24	0.24	1.50	1.02	0.67	0.98
37	Nova Štifta - Cerkev Marijinega vnebovzetja	0.18	0.17	0.30	0.58	0.58	1.71	1.73
38	Olimje - Cerkev Marijinega vnebovzetja	0.21	0.20	0.36	0.58	0.55	1.73	1.81
39	Piran - Cerkev sv. Jurija	0.30	0.09	0.20	1.50	0.45	0.67	2.21
40	Postojna - Cerkev sv. Štefana	0.22	0.15	0.48	0.46	0.32	2.16	3.16
41	Predenca - Cerkev sv. Roka	0.27	0.14	0.24	1.11	0.59	0.90	1.69
42	Ptujska Gora - Cerkev Marije zaščitnice	0.20	0.13	0.30	0.66	0.45	1.52	2.24
43	Rogatec - Cerkev sv. Hiacinte	0.26	0.16	0.24	1.10	0.66	0.91	1.52
44	Rogatec - Cerkev sv. Jerneja	0.24	0.14	0.36	0.67	0.39	1.50	2.58
45	Ruše - Cerkev Matere božje	0.22	0.21	0.24	0.90	0.87	1.11	1.14
46	Selo na Goričkem - Cerkev sv. Nikolaja	0.32	0.28	0.20	1.60	1.42	0.62	0.70
47	Sladka Gora - Cerkev Matere božje	0.23	0.19	0.30	0.78	0.64	1.29	1.56
48	Slovenj Gradec - Cerkev sv. Duha	0.26	0.22	0.20	1.29	1.10	0.77	0.91
49	Slovenj Gradec - Cerkev sv. Elizabete	0.25	0.19	0.24	1.04	0.81	0.96	1.24
50	Slovenske Konjice - Cerkev sv. Jurija	0.23	0.21	0.25	0.91	0.83	1.10	1.21
51	Smladnik - Cerkev sv. Urha	0.20	0.17	0.54	0.37	0.32	2.67	3.17
52	Suha pri Škofji Loki - Cerkev sv. Janeza Krstnika	0.30	0.21	0.54	0.56	0.38	1.78	2.62

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 12

Št.	Ime enote	γ_x^*	γ_y^*	β	γ_x	γ_y	$I_{R-\gamma,x}$	$I_{R-\gamma,y}$
53	Svete gore - Cerkev Matere božje	0.30	0.14	0.48	0.62	0.29	1.62	3.44
54	Svete gore - Kapela Lurške Matere božje	0.44	0.26	0.32	1.36	0.80	0.73	1.24
55	Svete gore - Kapela sv. Boštjana	0.32	0.29	0.32	0.99	0.90	1.01	1.11
56	Svete gore - Kapela sv. Jurija	0.49	0.34	0.32	1.55	1.06	0.65	0.95
57	Svete gore - Kapela sv. Martina	0.39	0.26	0.32	1.21	0.81	0.83	1.23
58	Šempas - Cerkev sv. Silvestra	0.16	0.17	0.42	0.39	0.41	2.55	2.41
59	Šmartno na Pohorju - Cerkev sv. Martina	0.31	0.24	0.24	1.29	0.99	0.78	1.01
60	Tolmin - Cerkev sv. Urha	0.41	0.17	0.32	1.29	0.54	0.77	1.84
61	Tunjice - Cerkev sv. Ane	0.20	0.19	0.45	0.43	0.41	2.30	2.42
62	Turnišče - Cerkev Marijinega vnebovzetja	0.34	0.17	0.24	1.43	0.69	0.70	1.45
63	Vipava - Cerkev sv. Štefana	0.26	0.14	0.42	0.63	0.34	1.59	2.96
64	Visoko pod Kureščkom - Cerkev sv. Nikolaja	0.46	0.25	0.32	1.43	0.80	0.70	1.26

Slika 33: Indeksi γ^* za obe pravokotni smeriFigure 33: γ^* indexes for two orthogonal directions

4.5.3.4 Primerjava z računskimi metodami

Kot smo omenili, je ena izmed prednosti indeksa γ_3 pred ostalima dvema indeksoma ta, da omogoča verifikacijo z računskimi metodami. Indeks γ_3 namreč predstavlja razmerje med ocenjeno potresno odpornostjo in zahtevami potresa. V nadaljevanju preverimo, ali ta hitra metoda daje rezultate na varni ali nevarni strani.

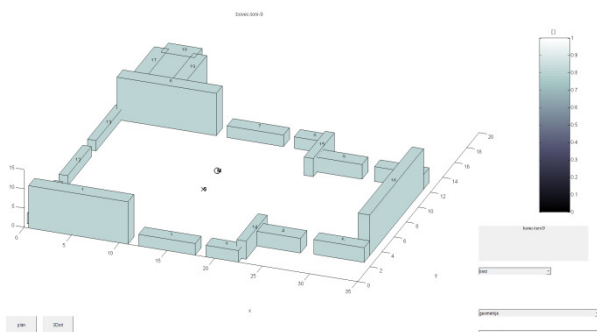
Za potrebe naloge smo izdelali računske analize potresne odpornosti za 15 karakterističnih objektov iz nabora obravnavanih objektov. Seizmično analizo izvedemo s programom SREMB (angl. *Seismic Resistance of Masonry Buildings*). Gre za poenostavljeno nelinearno statično (pushover) analizo, ki temelji na predpostavki o formiranju etažnega porušnega mehanizma. Potresno odpornost zgradbe ocenimo s krivuljo potresne odpornosti, ki prikazuje razmerje med vsiljenimi vodoravnimi pomiki etaže in odpornostjo etaže. Osnove metode so podane v (Tomaževič, 1987), primeri uporabe pa v (npr. Štampfl, 2003, Naglič, 2011). Osnovne predpostavke metode so sledeče:

- zidovi so povezani med seboj z vodoravnimi vezmi in s stropnimi konstrukcijami, ki so toge v svoji ravnini,
- zidovi so vpeti na zgornjem in spodnjem robu v stropno konstrukcijo ali pa v prekladni in parapetni del zidu,
- zidove sestavljenih prerezov obravnavamo kot vsoto na navpičnih stikih med seboj ločenih zidov,
- prispevek zidov k odpornosti etaže je odvisen od njihove togosti in nosilnosti, pa tudi od njihove deformacije, ki je odvisna predvsem od lege zidu v tlorisu etaže,
- zidovi prenašajo svoj delež obtežbe samo toliko časa, dokler njihove deformacije ne presežejo deformacij na meji porušitve, pri čemer upoštevamo, da zidovi prenašajo obtežbo tudi v nelinearnem območju.

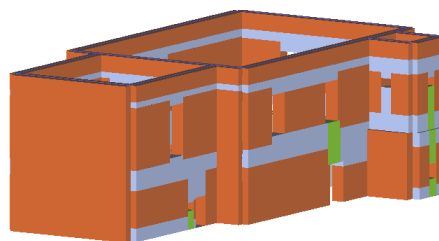
Potresna odpornost izračunana s programom SREMB je izražena s koeficientom potresne odpornosti kot razmerje med idealizirano potresno odpornostjo in težo objekta ($SRC_i = H_{id,i}/W$). To primerjamo z delom indeksa γ_3 , ki izraža potresno odpornost ($\gamma_{3,i}^* = V_{Rd,i}/W$). Primerjave potresne ogroženosti ne izvajamo, saj so zahteve potresa pri obeh metodah enake.

Za primerjavo podajamo še rezultate natančnejše računske analize s programom 3MURI za tri obravnavane objekte. Rezultati so povzeti po (Naglič, 2011), kjer je predstavljena parametrična analiza sakralnih objektov z različnimi računskimi metodami in materialnimi karakteristikami. Prikazujemo rezultate, ki so bili dobljeni ob upoštevanju podobnih materialnih karakteristik, kot smo jih upoštevali v okviru naloge. Program 3MURI temelji na podobnem principu kot program SREMB – gre za nelinearno statično analizo, le da ta program omogoča obravnavo celotnega objekta. Poleg tega

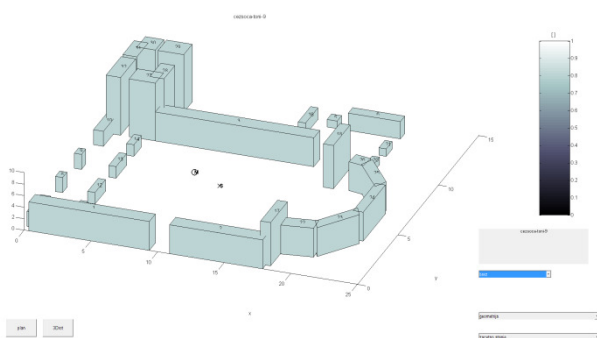
omogoča tudi upoštevanje podajnih stropnih konstrukcij, kot so leseni stropovi in oboki, vendar ob predpostavki, da so izvenravninski mehanizmi zidov preprečeni.



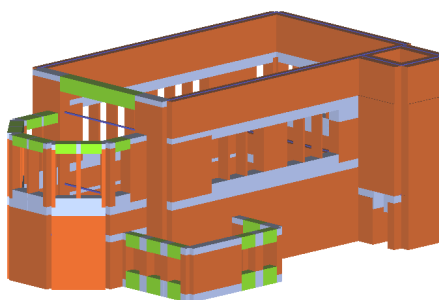
a) Računski model programa SREMB, Bovec - Cerkev sv. Urha.



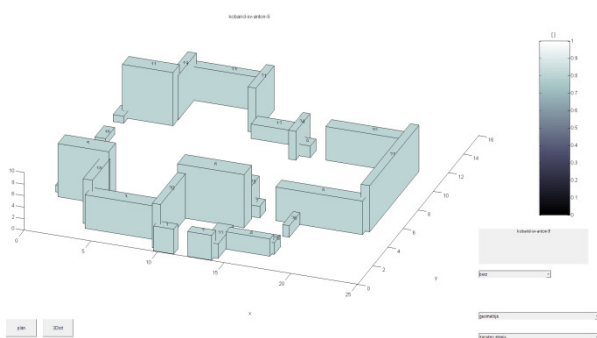
b) Računski model programa 3MURI, Bovec - Cerkev sv. Urha (Naglič, 2011).



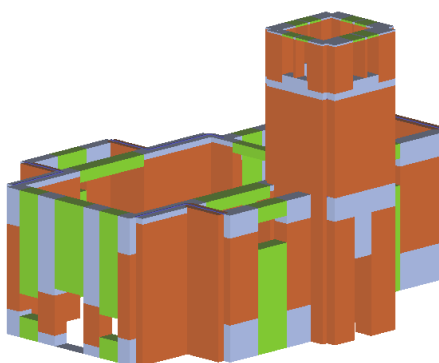
c) Računski model programa SREMB, Čezsoča - Cerkev sv. Antona Puščavnika.



č) Računski model programa 3MURI, Čezsoča - Cerkev sv. Antona Puščavnika (Naglič, 2011).



d) Računski model programa SREMB, Kobarid - Cerkev sv. Antona Padovanskega.

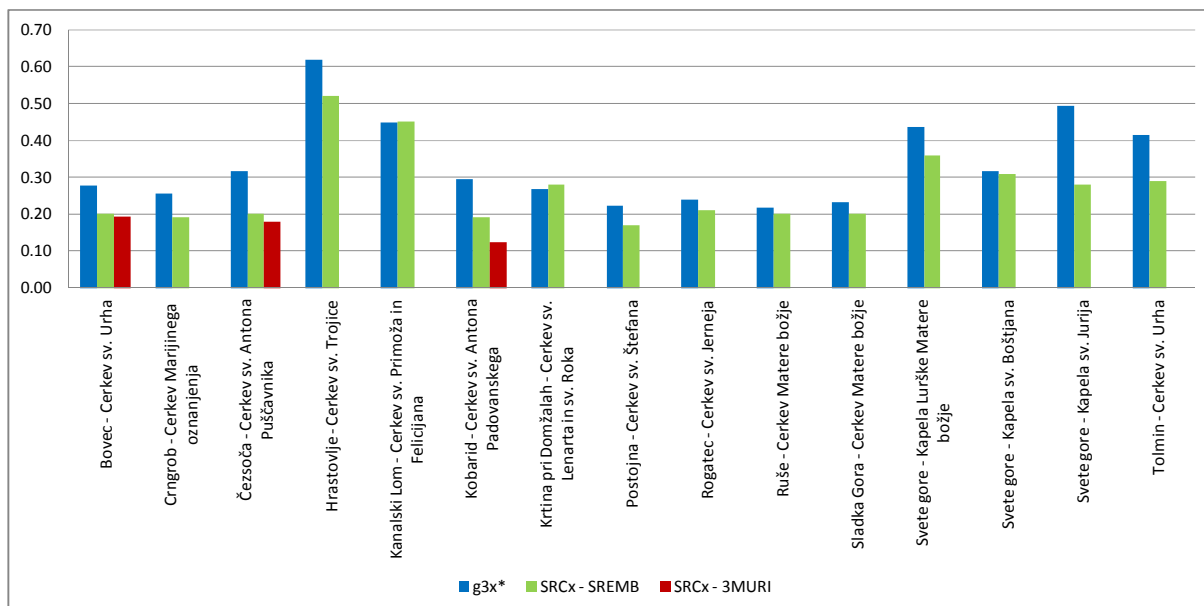


e) Računski model programa 3MURI, Kobarid - Cerkev sv. Antona Padovanskega (Naglič, 2011).

Slika 34: Primeri računskih modelov cerkva analiziranih s programoma SREMB in 3MURI

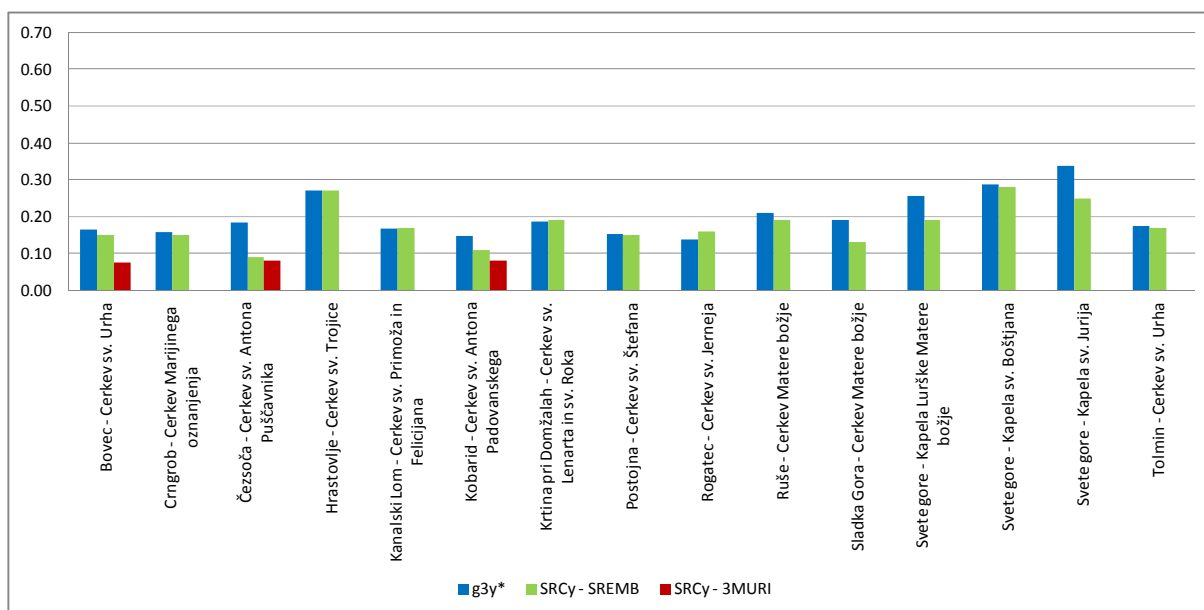
Figure 34: Examples of structural models for churches analysed with SREMB and 3MURI software

Primerjava pokaže, da so koeficienti potresne odpornosti SRC_i izračunani s programom SREMB v večini primerov nekoliko nižji od ocenjenih koeficientov $\gamma_{3,i}^*$ (sliki 35 in 36). V vzdolžnih smereh so vrednosti SRC_i v povprečju nižje za 20 %, v prečnih smereh pa za 10 % glede na vrednosti $\gamma_{3,i}^*$. Vrednosti izračunane s programom 3MURI so v vseh treh primerih še nekoliko nižje.



Slika 35: Primerjava koeficientov potresnih odpornosti za vzdolžno (x) smer

Figure 35: Comparison of seismic resistance coefficients for longitudinal (x) direction



Slika 36: Primerjava koeficientov potresnih odpornosti za prečno (y) smer

Figure 36: Comparison of seismic resistance coefficients for transverse (y) direction

Da so izračunane potresne odpornosti s programom SREMB manjše od ocenjenih vrednosti z indeksom γ_3 , si je mogoče razložiti takole:

- Ocenjena potresna odpornost ($\gamma_{3,i}^*$) je določena kot vsota strižnih nosilnosti posameznih elementov, in tako predstavlja maksimalno možno (strižno) nosilnost. Na drugi strani je pri programu SREMB pri določitvi potresne odpornosti upoštevano, da se potresna obtežba na posamezne elemente prenaša v razmerju njihovih togosti. Ker so elementi različno togi, je njihova skupna nosilnost zato manjša.
- Pri programu SREMB so upoštevani tudi torzijski vplivi, ki zmanjšujejo potresno odpornost.
- Pri programu SREMB je poleg strižne nosilnosti preverjana tudi upogibna nosilnost, ki je lahko manjša (merodajna), zaradi česar je potresna odpornost lahko manjša.
- Računska potresna odpornost programa SREMB se nanaša na idealizirano krivuljo potresne odpornosti in je manjša od maksimalne vrednosti izračunane krivulje potresne odpornosti.

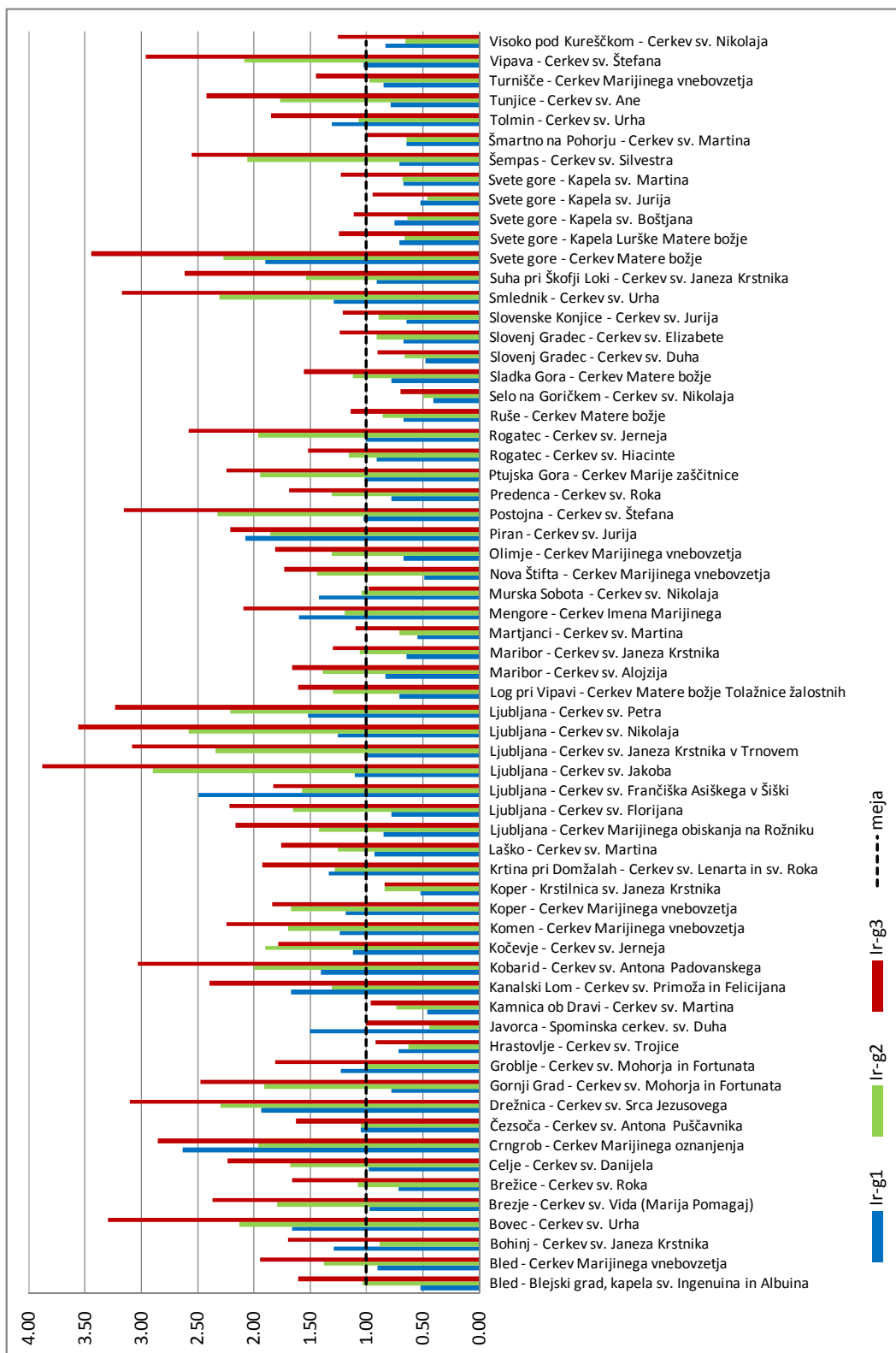
Da pa so kljub temu v nekaterih primerih razlike majhne oziroma so računske potresne odpornosti celo večje od ocenjenih, si razlagamo tako:

- Program SREMB upošteva, da so vsi elementi nosilni tudi izven svoje ravnine, kar pri oceni potresne odpornosti ne upoštevamo.
- Pri programu SREMB so v splošnem upoštevane nekoliko manjše teže (W), saj se upoštevajo mase nad izbranim prerezom porušnega mehanizma.

Dejstvo, da so vrednosti $\gamma_{3,i}^*$ v splošnem višje od računskih potresnih odpornosti SRC_i , nakazuje, da so vrednosti indeksov γ_3 precenjene – torej v smislu kontrole nosilnost-obremenitev na nevarni strani. Tu je potrebno izpostaviti, da poenostavljeni indeksi že po definiciji predstavljajo zgolj indikator ogroženosti in ne izražajo dejanskega stanja. Po drugi strani pa je glede opisa dejanskega obnašanja obravnavanih konstrukcij vprašljiva tudi seizmična analiza s programom SREMB. Ena izmed ključnih predpostavk programa je namreč povezava zidov z diafragmami na nivoju stropnih konstrukcij, kateri pa pri obravnavi sakralnih objektov v splošnem ni zadoščeno. Primeri analize z natančnejšo računsko metodo – programom 3MURI, ki upošteva tudi podajnost stropnih konstrukcij, nakazujejo, da so dejanske potresne odpornosti objektov lahko še nižje.

4.5.3.5 Medsebojna primerjava indeksov

V nadaljevanju podajamo primerjavo med indeksi γ_1 , γ_2 in γ_3 . Pri posameznem indeksu kot merodajnega upoštevamo manjšega od indeksov za vzdolžno in prečno smer. Indeksi med seboj niso neposredno primerljivi, lahko pa jih primerjamo v smislu indeksov potresne ogroženosti I_R . Primerjava med posameznimi indeksi pokaže velike razlike. Najnižje vrednosti indeksa potresne ogroženosti dobimo pri indeksih γ_1 , najvišje pa pri indeksih γ_3 (slika 37).



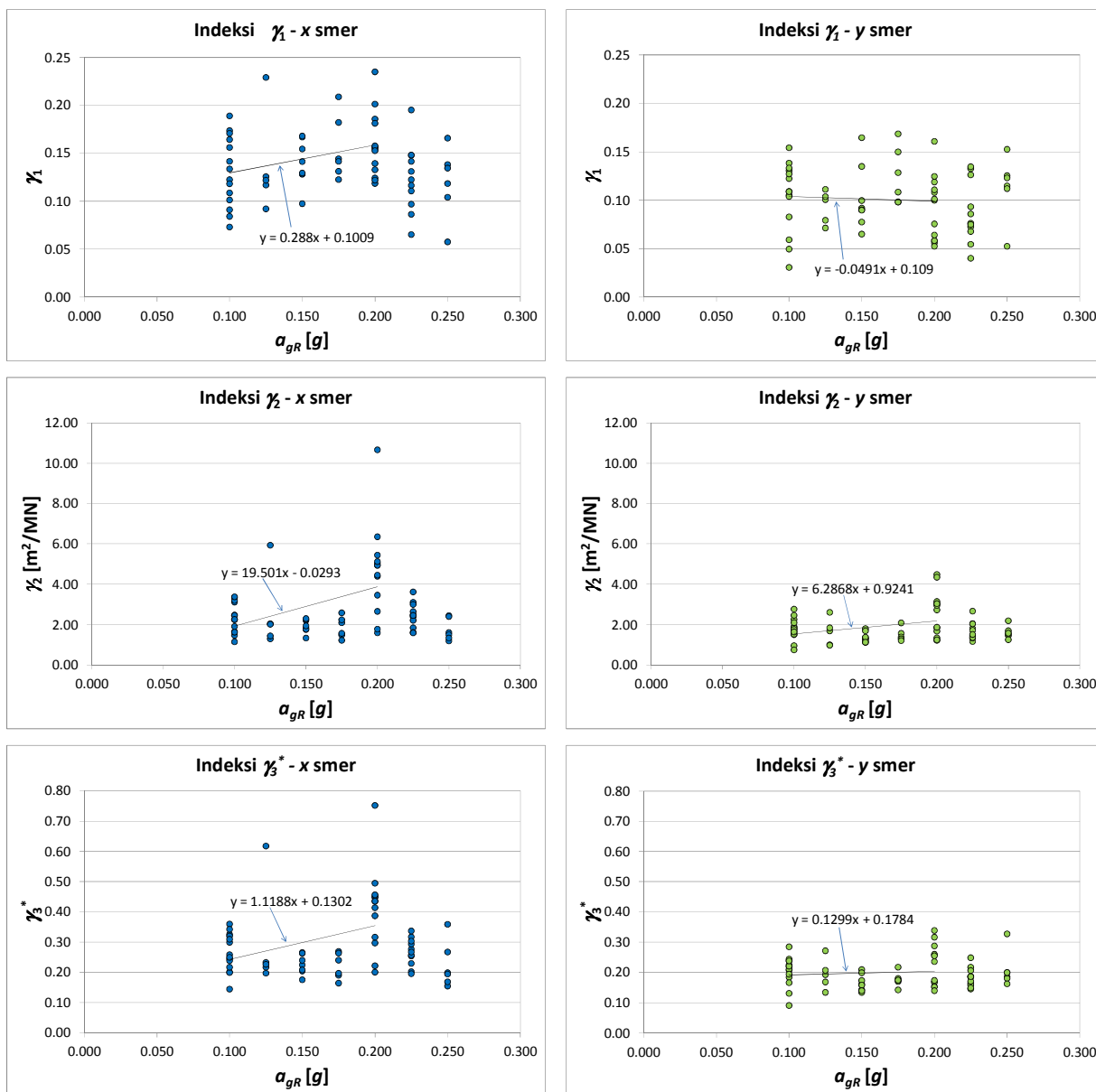
Slika 37: Primerjava indeksov potresne ogroženosti I_R za γ_1 , γ_2 in γ_3

Figure 37: Comparison of seismic risk I_R for γ_1 , γ_2 and γ_3

4.5.3.6 Vpliv seizmičnosti lokacije

V nadaljevanju ugotavljamo vpliv seizmičnosti lokacije na velikost posameznih indeksov. S tem želimo preveriti domnevo, da so stavbarji pri zasnovi objektov že upoštevali določene kriterije seizmičnosti. Pri seizmičnosti ne upoštevamo parametrov temeljnih tal in faktorja pomembnosti, temveč le referenčni pospešek temeljnih tal a_{gR} . Ker je pri indeksu γ_3 seizmičnost že upoštevana, tu upoštevamo le del indeksa, ki odraža nosilnost zidov γ_3^* .

Rezultati za vse obravnavane objekte so prikazani na sliki 38. Proti pričakovanjem se izkaže, da naraščanje vrednosti indeksov z naraščajočo seizmičnostjo ni izrazito. Trend naraščanja indeksov je zaznati predvsem za vzdolžno (x) smer objektov, vendar le do seizmičnosti 0.2 g, potem pa vrednosti padajo. Da bi v tem oziru podali splošno veljavne zaključke, je vzorec objektov premajhen in preveč raznolik – upoštevani so namreč zelo različni objekti: kapele, enostavne enoladijske cerkve in večladijske bazilike. Lahko pa domnevamo, da je seizmičnost do neke mere bila upoštevana, kar kaže večanje deleža zidov z naraščajočo seizmičnostjo, pri čemer je možno, da so bila današnja območja najvišje seizmičnosti v preteklosti opredeljena kot manj potresno ogrožena.



Slika 38: Indeksi γ_1 , γ_2 in γ_3^* v odvisnosti od seizmičnosti lokacije a_{gR}

Figure 38: Relationship between indexes γ_1 , γ_2 , γ_3^* and seismicity a_{gR}

4.5.4 Zvoniki

4.5.4.1 Splošno

Zvoniki zaradi svojih specifičnih lastnosti zahtevajo posebno obravnavo. Gre za vitke konstrukcije s poudarjeno eno dimenzijo – višino. Lahko so povsem ločeni od osnovnega cerkvenega objekta (kampanile), prislonjeni k enemu od zidov ladje ali prezbiterija ali pa so integrirani v nosilno zidovje osnovnega objekta. V vsakem primeru se njihovo obnašanje pri potresni obtežbi razlikuje od obnašanja preostalega objekta. Zaradi svoje vitkosti so bolj podajni ter imajo zato drugačne dinamične

karakteristike – pričakovane so daljše osnovne nihajne dobe, poleg tega pa njihova vitkost narekuje tudi drugačne porušne mehanizme. Bolj kot strižno porušitev zidov pri zvonikih kot merodajno pričakujemo upogibno porušitev.

4.5.4.2 Poenostavljeni indeksi za zvonike

Izhajamo iz enačbe (3) za določitev indeksa γ_3 , ki smo jo uporabili za oceno ogroženosti sakralnih objektov, pri čemer pa pri zvonikih preverimo tako strižni kot upogibni porušni mehanizem (22). Kot smo že omenili, je pri zvonikih sicer bolj verjetno formiranje upogibnega porušnega mehanizma, pri bolj čokatih zvonikih pa je lahko merodajen tudi strižni mehanizem.

$$\gamma_{3,i}^{\text{zvonik}} = \frac{V_{Rd-u,i}}{V_{E,i}} = \frac{\min(V_{Rd-f,i}, V_{Rd-s,i})}{V_{E,i}} \quad (22)$$

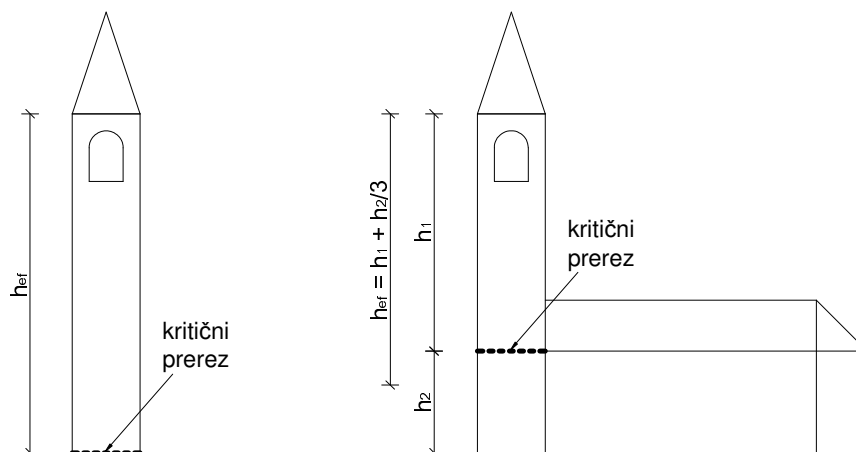
Oznake v gornji enačbi pomenijo:

- $V_{Rd-u,i}$ mejna nosilnost zvonika v kritičnem prerezu v »i« smeri,
- $V_{Rd-f,i}$ upogibna nosilnost zvonika v kritičnem prerezu v »i« smeri, izražena s horizontalno silo, ki povzroči mejni upogibni moment v kritičnem prerezu,
- $V_{Rd-s,i}$ strižna nosilnost zvonika v kritičnem prerezu v »i« smeri,
- $V_{E,i}$ strižna obremenitev zaradi potresa v kritičnem prerezu v »i« smeri.

Pri samostoječih zvonikih za kritični prerez upoštevamo prerez na nivoju terena, pri zvonikih, ki niso ločeni od osnovnega objekta, pa prerez, kjer pride do hipne spremembe togosti po višini – običajno je to v višini stropne konstrukcije ali kapi osnovnega objekta (slika 39). Glede na to, da se debelina zidov zvonikov v splošnem z višino zmanjšuje, poleg tega pa so lahko prisotne oslavitve zaradi odprtih, bi bilo za bolj zanesljivo določitev potresne odpornosti zvonika potrebno preveriti različne višinske prereze. Ker je namen naloge predvsem hitra in enostavna ocena potresne ogroženosti, preverjamo potresno odpornost le v predpostavljenih kritičnih prerezih.

Da so pri zvonikih večinoma merodajni prerezi ob vpetju, ugotavlja tudi Curti s sodelavci (2008), ki je analiziral 31 zvonikov poškodovanih v furlanskem potresu l. 1976. Poudarjeno je, da so pri zvonikih potresno še posebej ranljiva območja zvonišč, kjer lahko pride do izvenravninskih porušnih mehanizmov, kar pa je težko zajeti s poenostavljenimi metodami.

Nedavne raziskave (Bosiljkov et al, 2010) kažejo, da je pri vitkih zidanih konstrukcijah s sestavljenimi prerezi za formiranje upogibnega porušnega mehanizma potreben pogoj medsebojnega sodelovanja zidov pri prevzemu vodoravne obtežbe. V primeru nezadostne vertikalne strižne trdnosti zidovine na stikih lahko pri določenih konfiguracijah sestavljenih prerezov pride do pojava vertikalnega strižnega mehanizma. V okviru poenostavljene metode za zvonike tega kriterija ne preverjamo.



Slika 39: Kritični prerezi in efektivne višine zvonikov

Figure 39: Critical cross sections and effective heights for bell towers

Pri določitvi strižne in upogibne nosilnosti zvonik obravnavamo kot škatlast prerez. Za določitev strižne nosilnosti upoštevamo isto enačbo kot pri računu indeksa za cerkve:

$$V_{Rd-s,i} = C_R \cdot A_{w,i} \frac{f_t}{b} \sqrt{\frac{\sigma_0}{f_t} + 1}, \quad (23)$$

pri čemer za površino zidov $A_{w,i}$ upoštevamo površino zidov v smeri potresa (stojine škatlastega prereza z upoštevanjem odprtin), za faktor b pa vrednost 1.5, saj gre za bolj vitke zidove.

Pri določitvi upogibne nosilnosti škatlastega prereza izhajamo iz enačbe za upogibno nosilnost zidu (Tomažević, 2009):

$$M_f = \frac{\sigma_0 \cdot t \cdot L^2}{2} \left(1 - \frac{\sigma_0}{0.85 \cdot f_c} \right), \quad (24)$$

kjer so:

- M_f mejna upogibna nosilnost zidu,
- σ_0 povprečna tlačna napetost v vodoravnem prerezu zidu zaradi navpične obtežbe,
- t debelina zidu,
- L dolžina zidu,
- f_c povprečna tlačna trdnost zidu.

Enačba temelji na predpostavki, da zid ni sposoben prevzeti nateznih napetosti, ki nastanejo pri horizontalni obtežbi. Na tegnjem robu zidu nastane razpoka, ki se širi, dokler napetosti na tlačnem robu ne dosežejo tlačne trdnosti. Pri računu upoštevamo, da vodoravni prerez zidu ostane raven vse do porušitve, potek tlačnih napetosti pa se nadomesti z ekvivalentnim tlačnim blokom (slika 40, levo

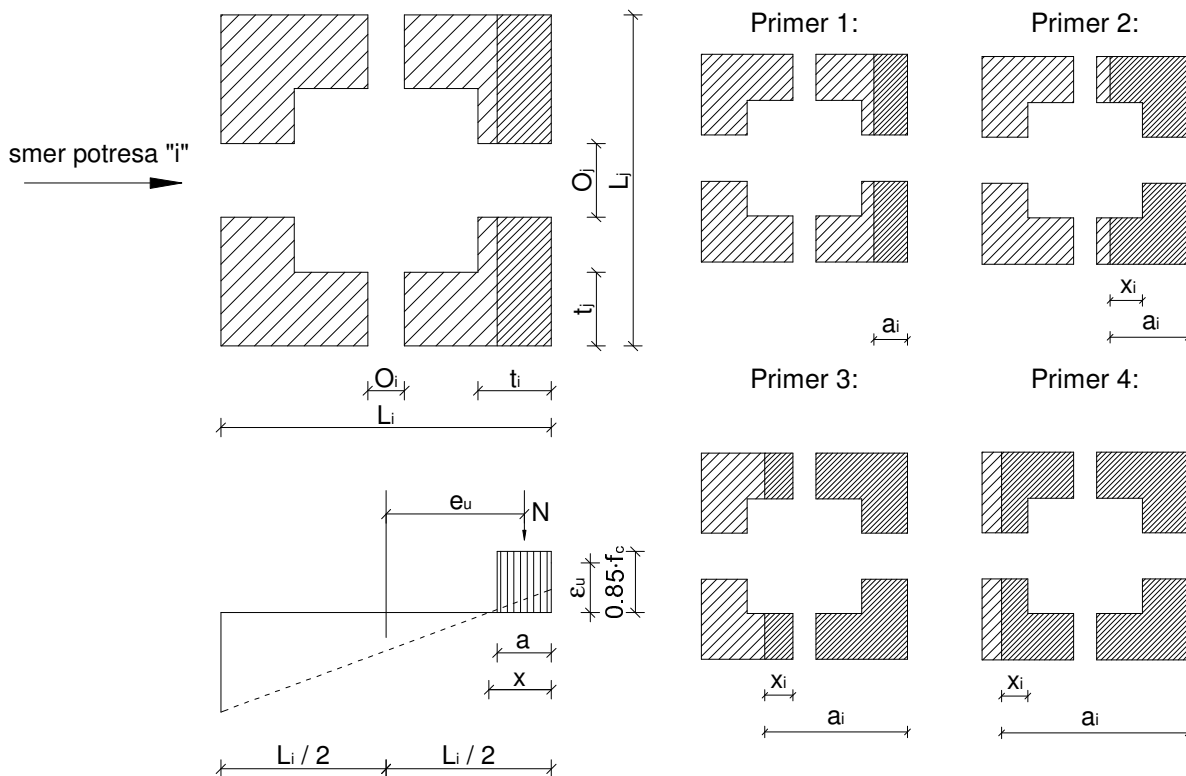
spodaj). Podobno enačbo podaja tudi standard EC8-3. Če enačbo (24) uporabimo na škatlastem prerezu, dobimo sledeče enačbe za upogibno nosilnost prereza v smeri »i«:

$$M_{Rd-i} = \frac{N}{2} \left(L_i - \frac{N}{0.85 \cdot f_c \cdot (L_j - O_j)} \right), \quad (25)$$

$$a_i = \frac{N}{0.85 \cdot f_c \cdot (L_j - O_j)}, \quad (26)$$

$$a_i \leq t_i. \quad (27)$$

Zgornja enačba (25) je podana tudi v (Calvi, Cecchi, 2007) za oceno potresne odpornosti zvonikov. Enačba je veljavna le v primeru, ko dolžina tlačnega bloka a_i ne presega debeline pasnice t_i . V nasprotnem primeru je potrebna modifikacija enačbe. Za škatlast prerez s simetričnimi odprtinami lahko identificiramo štiri različne primere glede obsega tlačnega bloka (slika 40) ter izpeljemo pripadajoče enačbe za račun upogibne nosilnosti. Podobne enačbe so za različne oblike simetričnih prerezov podane v (Favaretto, 2012).



Slika 40: Shema prereza zvonika za določitev upogibne nosilnosti

Figure 40: Scheme of bell tower cross section for determination of flexural capacity

Za primer 1 (slika 40) veljajo enačbe (25)–(27). Če kriterij (27) ni izpolnjen, preverimo enačbe za primer 2:

$$M_{Rd-2,i} = t_i \cdot (L_j - O_j) \cdot 0.85 f_c \left(\frac{L_i - t_i}{2} \right) + t_j \cdot 0.85 f_c \cdot x_i \cdot (L_i - 2 \cdot t_i - x_i), \quad (28)$$

$$x_i = \frac{N}{2 \cdot t_j \cdot 0.85 \cdot f_c} - \frac{t_i \cdot (L_j - O_j)}{2 \cdot t_j}, \quad (29)$$

$$a_i = x_i + t_i, \quad (30)$$

$$t_i < a_i \leq \frac{L_i}{2} - \frac{O_i}{2}. \quad (31)$$

Če kriterij (31) ni izpolnjen, preverimo enačbe za primer 3:

$$M_{Rd-3,i} = t_i \cdot (L_j - O_j) \cdot 0.85 f_c \left(\frac{L_i - t_i}{2} \right) + t_j \cdot 0.85 f_c \cdot \left(\frac{L_i}{2} - t_i - \frac{O_i}{2} \right) \cdot \left(\frac{L_i}{2} - t_i + \frac{O_i}{2} \right) - \quad (32)$$

$$- t_j \cdot 0.85 f_c \cdot x_i (O_i + x_i),$$

$$x_i = \frac{N}{2 \cdot t_j \cdot 0.85 \cdot f_c} - \frac{t_i \cdot (L_j - O_j)}{2 \cdot t_j} - \frac{L_i}{2} + t_i + \frac{O_i}{2}, \quad (33)$$

$$a_i = \frac{L_i}{2} + \frac{O_i}{2} + x_i, \quad (34)$$

$$\frac{L_i}{2} - \frac{O_i}{2} < a_i \leq L_i - t_i. \quad (35)$$

Če kriterij (35) ni izpolnjen, preverimo enačbe za primer 4:

$$M_{Rd-4,i} = t_i \cdot (L_j - O_j) \cdot 0.85 f_c \left(\frac{L_i - t_i}{2} \right) - 0.85 f_c \cdot (L_j - O_j) \cdot x_i \left(\frac{L_i - t_i + x_i}{2} \right), \quad (36)$$

$$x_i = \frac{N}{0.85 \cdot f_c \cdot (L_j - O_j)} - t_i + \frac{2 \cdot t_j \cdot (L_i - 2 \cdot t_i - O_i)}{L_j - O_j}, \quad (37)$$

$$a_i = L_i - t_i + x_i, \quad (38)$$

$$L_i - t_i < a_i \leq L_i. \quad (39)$$

Če tudi kriterij (39) ni izpolnjen, pomeni, da je tlačna nosilnost zidovja prekoračena že zaradi vertikalne obtežbe.

Oznake v enačbah od (25) do (39) pomenijo:

- N osna sila v obravnavanem prerezu zaradi vertikalne obtežbe,
 f_c tlačna trdnost zidu,
 L_i, L_j zunanji dimenziji škatlastega prereza,
 O_i, O_j dimenziji odprtin,
 t_i, t_j dimenziji debelin sten,
 x_i spremenljivi del dolžine tlačnega bloka (slika 40),
 a dolžina tlačnega bloka.

Da bi lahko upogibno nosilnost neposredno primerjali z strižno nosilnostjo, upogibno nosilnost izrazimo s horizontalno silo, ki v kritičnem prerezu povzroči mejni upogibni moment $M_{Rd,i}$, oziroma mejno strižno silo ob vpetju $V_{Rd-f,i}$. Ob predpostavki o zgornje trikotni razporeditvi potresnih sil po višini zvonika (slika 42) mejnemu upogibnemu momentu ustreza strižna sila:

$$V_{Rd-f,i} = \frac{3 \cdot M_{Rd,i}}{2 \cdot h_{ef}}, \quad (40)$$

pri čemer je:

- h_{ef} efektivna višina zvonika (slika 39).

Sedaj določimo še obremenitve zaradi potresa. Za razliko od osnovnega indeksa, kjer smo pri določitvi potresne obtežbe predpostavili maksimalno vrednost v spektru odziva, tu upoštevamo, da je potresna obremenitev odvisna od dinamičnih karakteristik posameznega objekta. Za strižno silo ob vpetju upoštevamo enačbo (11), pri čemer zaradi morebitnih različnih dinamičnih karakteristik zvonika v posameznih pravokotnih smereh, določimo potresno obremenitev ločeno za obe smeri.

$$V_{E,i} = S_d(T_{1,i}) \cdot m \cdot \lambda \quad (41)$$

Pri tem upoštevamo korekcijski faktor $\lambda = 0.85$, saj zvonike lahko opredelimo kot objekte z več kot tremi etažami.

Za določitev ordinate v projektnem spektru upoštevamo sledeče enačbe, ki jih podaja EC8.

$$0 \leq T \leq T_B : S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \left(\frac{2.5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right] \quad (42)$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2.5}{q} \quad (43)$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_d(T) \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2.5}{q} \cdot \left(\frac{T_C}{T} \right) \\ \geq 0.2 \cdot a_g \end{cases} \quad (44)$$

$$T_D \leq T: S_d(T) \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2.5}{q} \cdot \left(\frac{T_C T_D}{T^2} \right) \\ \geq 0.2 \cdot a_g \end{cases} \quad (45)$$

Pri tem so:

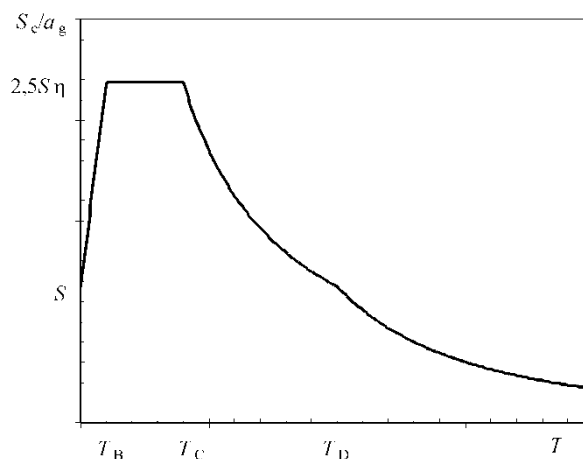
T nihajni čas linearnega sistema z eno prostostno stopnjo,

a_g projektni pospešek za tla tipa A ($a_g = \gamma_I a_{gR}$),

S faktor tal (preglednica 5),

q faktor obnašanja,

T_B, T_C, T_D vrednosti nihajnih časov, ki določajo obliko spektra, odvisne od tipa tal (pregl. 5).



Slika 41: Oblika potresnega spektra odziva (SIST EN 1998-1:2005: str. 33)

Figure 41: Shape of response spectra (SIST EN 1998-1:2005: p. 33)

Osnovni nihajni čas T_1 bomo določili z uporabo približnih izrazov. Pri tem se opremo na standard Evrokod, ki ponuja več različnih izrazov za različne tipe konstrukcij. Prva možnost je empirična enačba za različne tipe konstrukcij (EC8):

$$T_1 = C_t \cdot H^{3/4}, \quad (46)$$

kjer je:

H višina zgradbe v m zaradi sile teže,

C_t faktor odvisen od tipa konstrukcije: $C_t = 0.085$ za jeklene okvire, $C_t = 0.075$ za betonske okvire, $C_t = 0.05$ za ostale konstrukcije (za zvonike upoštevamo $C_t = 0.05$).

Druga enačba zahteva račun pomikov na vrhu zgradbe (EC8):

$$T_1 = 2 \cdot \sqrt{d}, \quad (47)$$

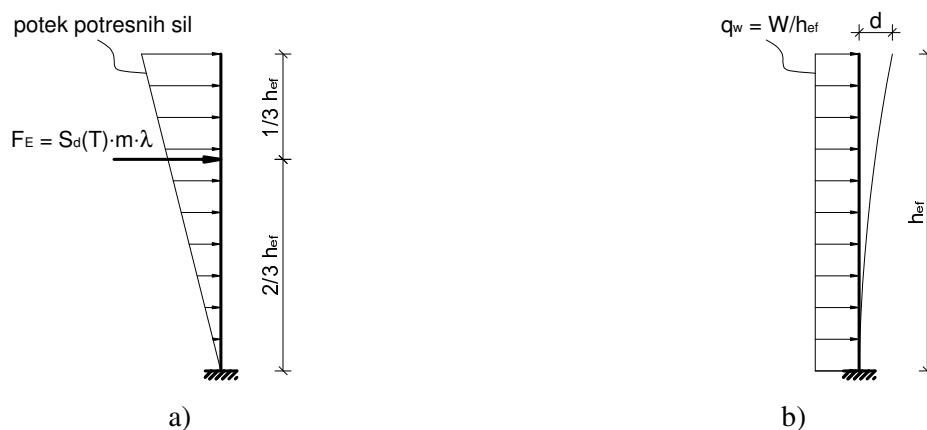
kjer je d vodoravni pomik na vrhu stavbe (v metrih) zaradi sile teže, ki deluje vodoravno (slika 42).

Če zvonik modeliramo z linijsko konzolo in predpostavimo, da je teža enakomerno razporejena po višini zvonika, lahko pomik d na vrhu izračunamo po splošni enačbi za pomik konzole:

$$d = \frac{q_w \cdot h_{ef}^4}{8 \cdot E \cdot I} = \frac{W \cdot h_{ef}^3}{8 \cdot E \cdot I}, \quad (48)$$

pri čemer so:

- q_w zvezno razporejena obtežba ($q_w = W/h_{ef}$),
- h_{ef} efektivna višina objekta (od vpetja),
- E elastični modul,
- I vztrajnostni moment (škatlastega) prereza,
- W celotna teža objekta.



Slika 42: Računski model zvonika; a) potek potresnih sil, b) določitev pomika d za oceno osnovnega nihajnega časa

Figure 42: Structural model for bell towers; a) distribution of seismic forces, b) determination of displacement d for estimation of natural period

Tretja možnost je uporaba enačbe za dimnike (EC1-4):

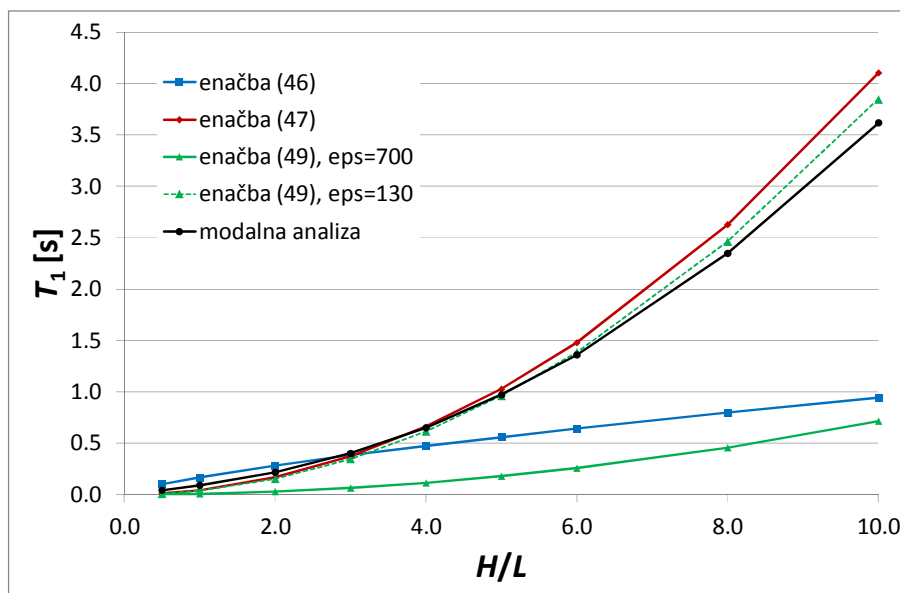
$$T_1 = \frac{1}{n_1}, \quad n_1 = \frac{\varepsilon_1 \cdot b}{h_{eff}^2} \sqrt{\frac{W_s}{W_t}}, \quad (49)$$

kjer so:

- ε_1 faktor odvisen od tipa konstrukcije: $\varepsilon_1 = 1000$ za jeklene dimnike, $\varepsilon_1 = 700$ za betonske in opečne dimnike (za zvonike upoštevamo $\varepsilon_1 = 700$),
- d premer na vrhu dimnika,
- h_{eff} efektivna višina dimnika: $h_{eff} = h_1 + h_2/3$, kjer je h_1 prosta višina dimnika (zgornji del), h_2 pa vpeta višina dimnika (spodnji del) oziroma višina spodnjega dela dimnika z večjo togostjo,
- W_s teža dimnika, ki prispeva k togosti,
- W_t celotna teža dimnika.

Primernost navedenih enačb za oceno nihajnega časa preverimo z modalno analizo, ki jo izvedemo s programom SAP2000. Zvonik modeliramo kot linijsko konzolo s konstantnim prerezom po višini. Za referenčni prerez izberemo pravokotni škatlast prerez z zunanjimi dimenzijami stranic dolžine 5.0 m in debelino sten 1.0 m. Konstrukcija je obremenjena samo z lastno težo, ki jo narekuje specifična teža zidov $\gamma_w = 22 \text{ kN/m}^3$. Upoštevamo elastični modul zidov $E = 1440 \text{ MPa}$ ter strižni modul $G = 240 \text{ MPa}$. Masa konstrukcije je zvezno razporejena po višini objekta. Preverimo dinamične karakteristike zvonikov višin od 2.5 do 50 m z vitkostmi $h/L = 0.5\text{--}10$.

Primerjava osnovnih nihajnih časov izračunanih s približnimi izrazi in nihajnimi časi dobljenimi z modalno analizo je za različne višine zvonikov prikazana na sliki 43. Razvidno je, da se z rezultati modalne analize najboljše ujemajo ocenjeni nihajni časi z enačbo (47). Ostali dve enačbi dajeta bistveno manjše vrednosti nihajnih časov. Enačba (46) je odvisna samo od višine konstrukcije in tako očitno ne zajame posebnosti vitkih konstrukcij, kot so zvoniki. Enačba (49) je sicer primerna za vitke konstrukcije (dimnike), vendar pa je faktor $\varepsilon_1 = 700$, ki velja za betonske in opečne konstrukcije očitno neprimeren za oceno nihajnih časov obravnavanih zvonikov, ki so večinoma grajeni iz kamnitega gradiva. Ob upoštevanju faktorja $\varepsilon_1 = 130$ bi bili nihajni časi dobro primerljivi z rezultati modalne analize (slika 43). V nadaljevanju naloge bomo za oceno osnovnih nihajnih časov zvonikov uporabili enačbo (47). Pri tem bomo iz enačbe za oceno nihajnih časov za dimnike (49) privzeli definicijo efektivne višine za zvonike, ki niso samostoječi (slika 39).



Slika 43: Primerjava osnovnih nihajnih časov izračunanih s približnimi enačbami in modalno analizo

Figure 43: Comparison of fundamental periods of vibrations calculated with approximate equations and modal analysis

Pri računu nosilnosti in določevanju dinamičnih karakteristik zvonikov upoštevamo enake mehanske karakteristike zidovja, kot smo jih upoštevali pri analizi osnovnih objektov. Upoštevamo mehanske karakteristike podane v preglednici 9 reducirane s faktorjem zaupanja $CF = 1.35$. Pri določitvi osnovnega nihajnega časa upoštevamo razpokanost prereza, kar upoštevamo tako, da v enačbi za račun pomika (48) upoštevamo polovično vrednost elastičnega modula.

4.5.4.3 Rezultati

Opisano metodo smo uporabili na obravnavanem naboru sakralnih objektov. Med obravnavanimi objekti so nekateri brez zvonika (kapele), pri nekaterih je zvonik zanemarljivo majhen (zvoniki na preslico, strešni jezdec, leseni zvoniki), pri nekaterih objektih pa nismo imeli dovolj razpoložljivih podatkov. Skupno smo tako preverili 47 zvonikov. Rezultati so prikazani tabelarično v preglednici 13 in grafično na sliki 47.

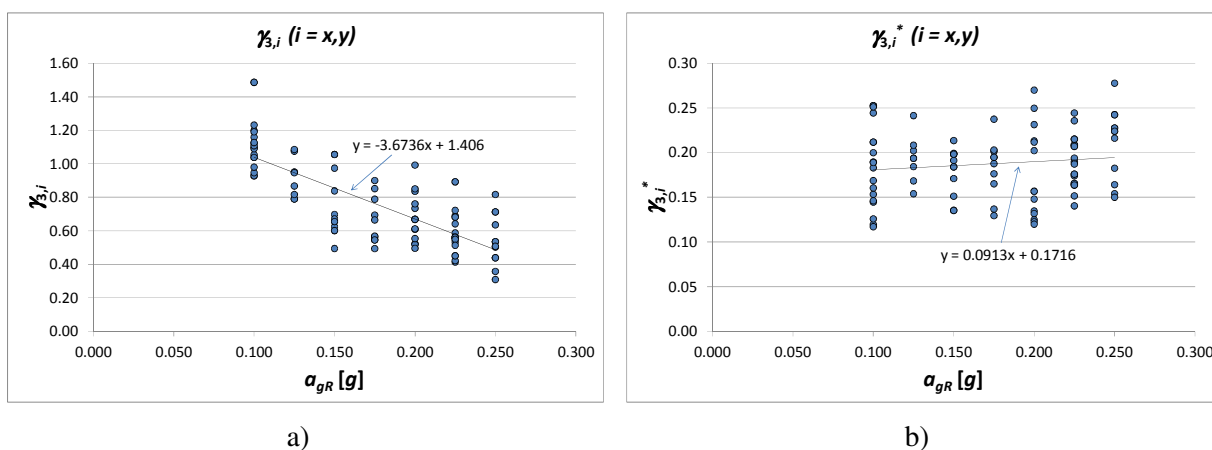
Vrednosti indeksov γ_3 se gibljejo od 0.31 (Ljubljana - Cerkev sv. Jakoba) do 1.49 (Kamnica ob Dravi - Cerkev sv. Martina). Pri tem efektivne višine obravnavanih objektov znašajo od 8.8 do 32 m, razmerja h_{ef}/L znašajo od 1.46 do 4.46, ocenjene vrednosti nihajnih časov pa od 0.18 do 1.05 s. Prisotne so manjše razlike glede obnašanja v x in y smereh, kar je posledica različnih dimenzij prerezov v posameznih smereh ter vpliva odprtih, so pa te razlike bistveno manj izrazite kot pri cerkvah. Od obravnavanih 47 zvonikov jih 39 (83 %) ne dosega zahtevanih mejnih vrednosti. Povprečna vrednost merodajnih indeksov (manjših izmed indeksov za x in y smer) znaša 0.73, kar je nekoliko višje kot pri osnovnih objektih (cerkvah), kjer povprečna vrednost indeksov γ_3 znaša 0.61.

Indeks γ_3 je močno odvisen od seizmičnosti lokacije, kar je glede na definicijo indeksa samoumevno: višje kot so zahteve potresa, manjša je vrednost indeksa in s tem večja potresna ogroženost (slika 44 a)). Če pri obravnavanih zvonikih analiziramo samo del indeksa, ki izraža potresno odpornost ($\gamma_3^* = V_{Rd-u}/W$), vidimo, da potresna ranljivost zvonikov ne kaže odvisnosti od seizmičnosti lokacije (slika 44 b)). To nakazuje, da stavbarji pri zasnovi zvonikov najverjetneje niso upoštevali posebnih kriterijev seizmičnosti. Zaradi pomanjkljivih podatkov tega seveda ne moremo z gotovostjo trditi. Možno je, da so na seizmičnih področjih za zvonike uporabili bolj kvalitetno zidavo (oblikovani kamni) in vgradil več zidnih vezi, kar pa izvedena analiza ne zajema.

Pri zvonikih so zahteve potresa (potresne sile) odvisne tudi od dinamičnih karakteristik,⁶ ki jih narekujejo predvsem geometrijske karakteristike zvonika, tako da primerjava indeksov γ_3^* s seizmičnostjo terena a_{gR} ne pokaže realne slike. Bolj vitki zvoniki imajo namreč daljše nihajne čase in

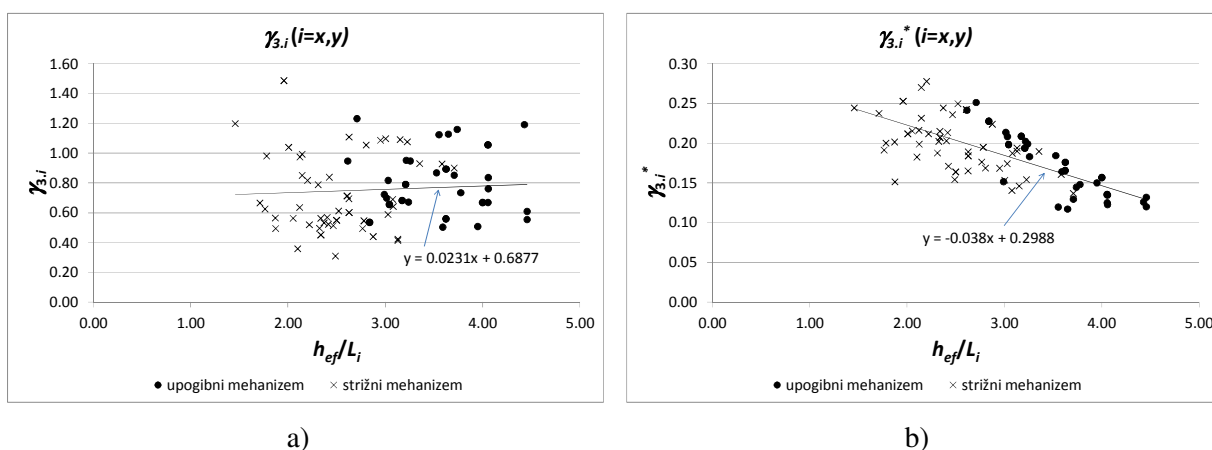
⁶ Potresne sile so načeloma odvisne od dinamičnih karakteristik objekta tudi pri cerkvah, vendar smo tam upoštevali maksimalne vrednosti v spektru odziva (predpostavljeni nihajni časi med T_B in T_C).

posledično manjše potresne sile. Če za merilo vitkosti izberemo razmerje med efektivno višino in dimenzijo zunanje stranice zvonika v kritičnem prerezu (h_{ef}/L), ugotovimo, da se indeks potresne odpornosti γ_3^* z večanjem vitkosti zmanjšuje (slika 45 b)). Če pa upoštevamo še vpliv seizmičnosti (indeks γ_3), vidimo, da vpliv vitkosti na indeks potresne varnosti ni izrazit oziroma razviden (slika 45 a)).



Slika 44: Vpliv seizmičnosti lokacije: a) indeksi γ_3 v odvisnosti od seizmičnosti a_{gR} , b) indeksi γ_3^* v odvisnosti od seizmičnosti a_{gR}

Figure 44: Influence of seismicity: a) relationship between indexes γ_3 and seismicity a_{gR} , b) relationship between indexes γ_3^* and seismicity a_{gR} ,

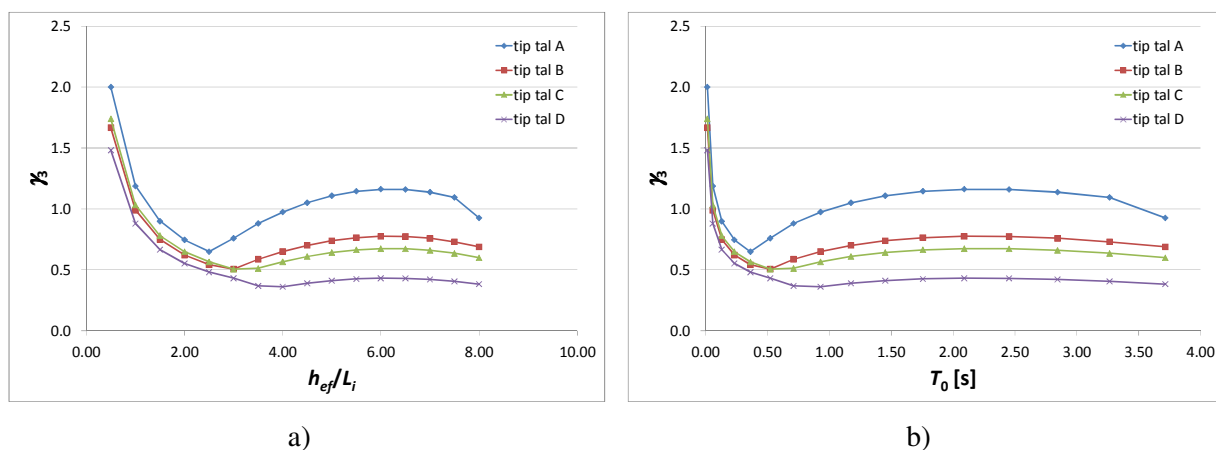


Slika 45: Vpliv vitkosti: a) indeksi γ_3 v odvisnosti od vitkosti h_{ef}/L , b) indeksi γ_3^* v odvisnosti od vitkosti h_{ef}/L

Figure 45: Influence of slenderness: a) relationship between indexes γ_3 and slenderness h_{ef}/L , b) relationship between indexes γ_3^* and slenderness h_{ef}/L

Da bi ugotovili, kakšen je vpliv vitkosti, smo izračunali indekse γ_3 za generirane zvonike z različnimi dinamičnimi karakteristikami pri enakih pogojih seizmičnosti ($a_{gR} = 0.25$) za različne tipe tal. Uporabimo geometrijske in materialne karakteristike, ki smo jih upoštevali pri analizi nihajnih časov s

programom SAP2000 v predhodnem poglavju. Izkaže se, da je vpliv vitkosti na indeks γ_3 povezan predvsem z obliko potresnega spektra (slika 41). Za območje vitkosti, ki ustreza nihajnim časom manjšim od vrednosti T_C , se z večanjem vitkosti indeks γ_3 zmanjšuje, za območje z nihajnimi časi med T_C in T_D se z večanjem vitkosti indeks γ_3 povečuje, za območje z nihajnimi časi večjimi od T_D pa se indeks z naraščanjem vitkosti zopet zmanjšuje (sliki 46 a) in b)).



Slika 46: Vpliv vitkosti in nihajnih časov: a) indeksi γ_3 v odvisnosti od vitkosti h_{eff}/L za generirane zvonike, b) indeksi γ_3 v odvisnosti od osnovnega nihajnega časa T_0 za generirane zvonike

Figure 46: Influence of slenderness and natural period: a) relationship between indexes γ_3 and slenderness h_{eff}/L for generated bell towers, b) relationship between indexes γ_3 and natural period T_0 for generated bell towers

Glede porušnega mehanizma zvonikov ugotavljamo, da je strižni mehanizem merodajen pri 60 % obravnavanih zvonikov (preglednica 13). Upogibni mehanizem je prevladujoč pri vitkejših zvonikih z razmerjem h_{eff}/L večjim od ~ 3.0 (slika 45).

Glede uporabe enačb za račun upogibne nosilnosti zvonikov (slika 40) je v večini primerov (70 %) ustrezala enačba za primer 1, enačba za primer 2 je bila merodajna v 28 % primerov, enačba za primer 3 je bila merodajna le v enem primeru, enačba za primer 4 pa v sklopu obravnavanih objektov ni bila merodajna.

Preglednica 13: Račun indeksov γ_s za zvonike

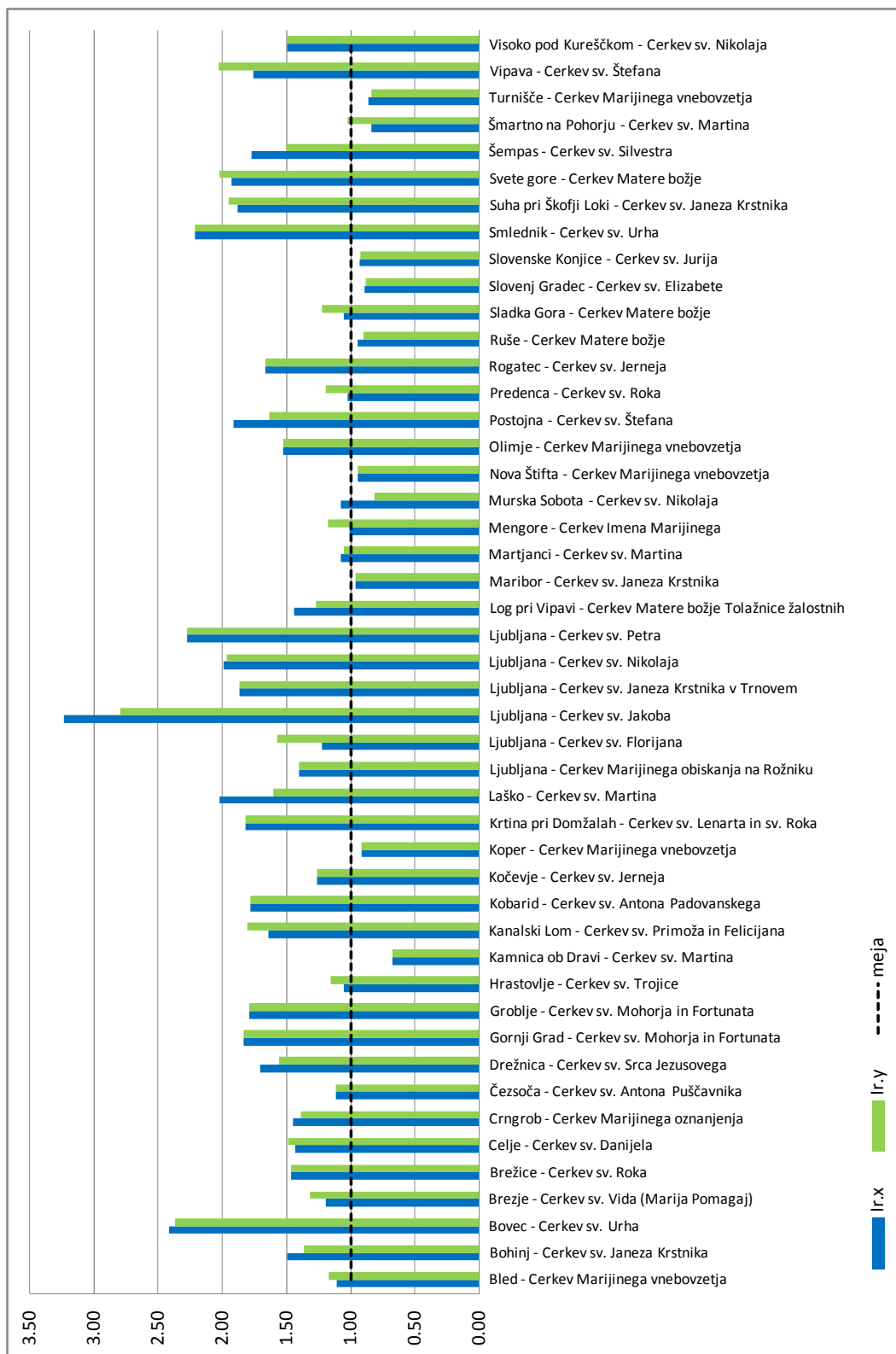
Table 13: Calculation of γ_s indexes for bell towers

Št.	Objekt	h_{tot} [m]	h_{ef} [m]	h_{ef}/L_x	h_{ef}/L_y	$T_{1,x}$ [s]	$T_{1,y}$ [s]	meh. x	meh. y	$\gamma_{s,x}$	$\gamma_{s,y}$	$I_R \cdot \gamma_{s,x}$	$I_R \cdot \gamma_{s,y}$
2	Bled - Cerkev Marijinega vnebovzetja	26.7	26.7	3.7	3.7	0.98	0.98	strig	upogib	0.90	0.85	1.11	1.17
3	Bohinj - Cerkev sv. Janeza Krstnika	21.9	21.9	4.1	3.8	0.91	0.84	upogib	upogib	0.67	0.73	1.50	1.36
4	Bovec - Cerkev sv. Urha	22.9	15.3	3.1	3.1	0.48	0.48	strig	strig	0.41	0.42	2.42	2.37
5	Brezje - Cerkev sv. Vida (Marija Pomagaj)	39.0	27.6	4.1	4.1	1.05	1.05	upogib	upogib	0.84	0.76	1.20	1.31
6	Brežice - Cerkev sv. Roka	21.8	15.9	3.2	3.2	0.43	0.43	upogib	upogib	0.68	0.68	1.47	1.47
7	Celje - Cerkev sv. Danijela	30.1	21.7	3.0	3.2	0.48	0.52	upogib	upogib	0.70	0.67	1.43	1.49
8	Crngrob - Cerkev Marijinega oznanjenja	32.0	32.0	3.1	3.0	0.94	0.91	strig	upogib	0.69	0.72	1.45	1.38
9	Čezsoča - Cerkev sv. Antona Puščavnika	20.9	14.5	3.6	3.6	0.52	0.52	upogib	upogib	0.89	0.89	1.12	1.12
10	Drežnica - Cerkev sv. Srca Jezusovega	26.5	17.6	3.0	3.1	0.52	0.52	strig	strig	0.59	0.64	1.70	1.56
11	Gornji Grad - Cerkev sv. Mohorja in Fortunata	27.6	17.8	2.8	2.8	0.46	0.46	strig	strig	0.55	0.55	1.83	1.83
12	Groblje - Cerkev sv. Mohorja in Fortunata	20.0	16.7	3.6	3.6	0.65	0.65	upogib	upogib	0.56	0.56	1.79	1.79
13	Hrastovlje - Cerkev sv. Trojice	13.4	10.9	3.2	3.5	0.36	0.39	upogib	upogib	0.95	0.87	1.05	1.15
15	Kamnica ob Dravi - Cerkev sv. Martina	19.4	12.7	2.0	2.0	0.23	0.23	strig	strig	1.49	1.49	0.67	0.67
16	Kanalski Lom - Cerkev sv. Primoža in Felicijana	15.6	15.6	4.5	4.5	0.78	0.78	upogib	upogib	0.61	0.55	1.64	1.80
17	Kobarid - Cerkev sv. Antona Padovanskega	15.7	10.2	2.1	2.3	0.23	0.26	strig	strig	0.56	0.56	1.78	1.78
18	Kočevje - Cerkev sv. Jerneja	31.5	21.5	3.2	3.2	0.52	0.52	upogib	upogib	0.79	0.79	1.27	1.27
20	Koper - Cerkev Marijinega vnebovzetja	36.0	25.5	3.0	3.2	0.73	0.76	strig	strig	1.10	1.09	0.91	0.92
22	Krtina pri Domžalah - Cerkev sv. Lenarta in sv. Roka	20.0	20.0	2.5	2.5	0.51	0.51	strig	strig	0.55	0.55	1.82	1.82
23	Laško - Cerkev sv. Martina	23.0	15.0	1.9	1.8	0.30	0.27	strig	strig	0.49	0.63	2.02	1.60
24	Ljubljana - Cerkev Marijinega obiskanja na Rožniku	18.0	12.0	2.6	2.6	0.32	0.32	strig	strig	0.71	0.71	1.40	1.40
25	Ljubljana - Cerkev sv. Florijana	20.0	11.7	2.2	2.1	0.25	0.25	strig	strig	0.82	0.64	1.22	1.57
27	Ljubljana - Cerkev sv. Jakoba	32.5	22.9	2.5	2.1	0.51	0.44	strig	strig	0.31	0.36	3.23	2.79
28	Ljubljana - Cerkev sv. Janeza Krstnika v Trnovem	27.0	16.5	2.8	2.8	0.42	0.42	upogib	upogib	0.54	0.54	1.87	1.87
29	Ljubljana - Cerkev sv. Nikolaja	35.7	23.7	3.6	4.0	0.78	0.86	upogib	upogib	0.50	0.51	1.99	1.97
30	Ljubljana - Cerkev sv. Petra	24.0	14.7	2.9	2.9	0.39	0.39	strig	strig	0.44	0.44	2.28	2.28
31	Log pri Vipavi - Cerkev Matere božje Tolažnice žalostnih	25.0	17.3	2.6	2.3	0.46	0.41	strig	strig	0.69	0.79	1.44	1.27
33	Maribor - Cerkev sv. Janeza Krstnika	30.0	17.7	2.0	2.0	0.29	0.29	strig	strig	1.04	1.04	0.96	0.96
34	Martjanci - Cerkev sv. Martina	19.0	14.3	3.6	3.3	0.59	0.53	strig	upogib	0.93	0.95	1.08	1.06
35	Mengore - Cerkev Imena Marijinega	13.0	8.8	2.1	2.1	0.23	0.23	strig	strig	0.99	0.85	1.01	1.18
36	Murska Sobota - Cerkev sv. Nikolaja	30.0	21.1	3.4	2.7	0.49	0.39	strig	upogib	0.93	1.23	1.08	0.81
37	Nova Štifta - Cerkev Marijinega vnebovzetja	39.0	24.7	4.1	4.1	0.99	0.99	upogib	upogib	1.06	1.06	0.95	0.95
38	Olimje - Cerkev Marijinega vnebovzetja	23.0	15.7	3.0	3.0	0.51	0.51	upogib	upogib	0.66	0.66	1.53	1.53
40	Postojna - Cerkev sv. Štefana	18.8	11.6	2.4	2.5	0.30	0.30	strig	strig	0.52	0.61	1.91	1.63

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 13

Št.	Objekt	h_{tot} [m]	h_{ef} [m]	h_{ef}/L_x	h_{ef}/L_y	$T_{1,x}$ [s]	$T_{1,y}$ [s]	meh. x	meh. y	$\gamma_{s,x}$	$\gamma_{s,y}$	$I_R \cdot \gamma_{s,x}$	$I_R \cdot \gamma_{s,y}$
41	Predenca - Cerkev sv. Roka	20.0	14.9	2.1	2.4	0.33	0.37	strig	strig	0.97	0.84	1.03	1.19
44	Rogatec - Cerkev sv. Jerneja	27.4	18.4	2.6	2.6	0.46	0.46	strig	strig	0.60	0.60	1.66	1.66
45	Ruše - Cerkev Matere božje	23.0	23.0	2.8	2.6	0.64	0.60	strig	strig	1.05	1.11	0.95	0.90
47	Sladka Gora - Cerkev Matere božje	20.0	13.3	2.6	3.0	0.36	0.41	upogib	upogib	0.95	0.82	1.06	1.22
49	Slovenj Gradec - Cerkev sv. Elizabete	27.0	27.0	3.6	3.6	0.96	0.98	upogib	upogib	1.12	1.13	0.89	0.89
50	Slovenske Konjice - Cerkev sv. Jurija	30.0	24.2	3.2	3.0	0.74	0.68	strig	strig	1.08	1.09	0.93	0.92
51	Smlednik - Cerkev sv. Urha	25.0	16.0	2.3	2.3	0.36	0.36	strig	strig	0.45	0.45	2.22	2.22
52	Suha pri Škofji Loki - Cerkev sv. Janeza Krstnika	17.0	12.3	2.4	2.5	0.31	0.32	strig	strig	0.53	0.51	1.88	1.95
53	Svete gore - Cerkev Matere božje	20.3	14.8	2.2	2.3	0.32	0.34	strig	strig	0.52	0.50	1.93	2.02
58	Šempas - Cerkev sv. Silvestra	20.0	10.7	1.9	1.7	0.22	0.20	strig	strig	0.56	0.67	1.77	1.50
59	Šmartno na Pohorju - Cerkev sv. Martina	17.0	12.8	1.5	1.8	0.18	0.21	strig	strig	1.20	0.98	0.83	1.02
62	Turnišče - Cerkev Marijinega vnebovzetja	25.0	19.7	3.7	4.4	0.82	0.97	upogib	upogib	1.16	1.19	0.86	0.84
63	Vipava - Cerkev sv. Štefana	20.0	14.7	2.4	2.8	0.37	0.42	strig	strig	0.57	0.49	1.76	2.02
64	Visoko pod Kureščkom - Cerkev sv. Nikolaja	16.0	13.2	4.0	4.0	0.58	0.58	upogib	upogib	0.67	0.67	1.50	1.50








Slika 47: Indeksi potresne ogroženosti I_R za zvonike za obe pravokotni smeri
Figure 47: Seismic risk indexes I_R for bell towers for both orthogonal directions

4.6 Makroseizmična metoda – RISK-UE 1. nivo

4.6.1 Opis metode

Splošen opis metodologije RISK-UE je podan v poglavju 3.1.2.3.3 pri pregledu literature. Kot je navedeno, gre za večstopenjsko metodologijo, ki razlikuje dva pristopa: makroseizmični in mehanični pristop. V nadaljevanju nekoliko podrobneje opišemo 1. nivo makroseizmičnega pristopa te metodologije. Opis metode je povzet po (Lagomarsino et al., 2004b, Lagomarsino et al., 2006, Lagomarsino, 2006).

V osnovi gre za empirično metodo s krivuljami ranljivosti, pri čemer so krivulje izpeljane iz opisa makroseizmične lestvice. Uporabljena je Evropska makroseizmična lestvica EMS-98. Gre za dvanajststopenjsko lestvico intenzitete, ki loči pet stopenj poškodovanosti objektov (slika 48), pri čemer objekte deli v šest razredov ranljivosti (A–F), glede na osnovni nosilni sistem.

	1. STOPNJA: Zanemarljive do majhne poškodbe (brez konstrukcijskih poškodb, majhne nekonstrukcijske poškodbe) Opis poškodb: lasaste razpoke na malo zidovih; odpadanje majhnih kosov ometa; v zelo malo primerih izpadanje nevezanih kamnov v zgornjih delih stavbe
	2. STOPNJA: Zmerne poškodbe (majhne konstrukcijske poškodbe, zmerne nekonstrukcijske poškodbe) Opis poškodb: razpoke na mnogo zidovih; odpadanje razmeroma velikih kosov ometa; delna porušitev dimnikov
	3. STOPNJA: Znatne do močne poškodbe (zmerne konstrukcijske poškodbe, močne nekonstrukcijske poškodbe) Opis poškodb: močne in obsežne razpoke na večini zidov; izpadanje strešnikov; porušitev dimnikov na nivoju strešne konstrukcije; porušitev posameznih nekonstrukcijskih elementov (predelne stene, zatrepne stene)
	4. STOPNJA: Zelo močne poškodbe (močne konstrukcijske poškodbe, zelo močne nekonstrukcijske poškodbe) Opis poškodb: močne poškodbe zidov (porušitev), delna porušitev strehe in medetažnih konstrukcij
	5. STOPNJA: Porušitev (zelo močne konstrukcijske poškodbe) Opis poškodb: popolna ali skoraj popolna porušitev

Slika 48: Stopnje poškodovanosti za zidane objekte (Grünthal, 1998: str. 15)

Figure 48: Classification of damage to masonry structures (Grünthal, 1998: p. 15)

Pri definiciji posameznih stopenj intenzitete so opisani vplivi potresa na ljudi, vplivi na okolje in poškodbe objektov. Opis poškodb objektov se nanaša na predhodno definirane stopnje poškodb za posamezne razrede ranljivosti objektov. Pričakovan delež poškodovanih objektov (določene ranljivosti

in določene stopnje poškodovanosti) je podan opisno z izrazi: nekaj (angl. few), veliko (angl. many), večina (angl. most). Avtorji metodologije RISK-UE so iz definicij posameznih stopenj intenzitete najprej tvorili matrike verjetnosti poškodb za posamezne razrede ranljivosti, pri čemer so opisne izraze za deleže poškodovanih objektov pretvorili v numerične. Za mero poškodovanosti so vpeljali povprečno vrednost poškodovanosti μ_D ($0 \leq \mu_D \leq 5$):

$$\mu_D = \sum_{k=0}^5 p_k k, \quad (50)$$

kjer je:

k stopnja poškodovanosti skladno z EMS-98 (dodana je stopnja 0 – brez poškodb),

p_k verjetnost za stopnjo poškodovanosti k .

Za posamezne razrede ranljivosti so pri danih stopnjah intenzitete nato izračunali povprečne vrednosti poškodovanosti ter tako dobili zveze med povprečnimi vrednostmi poškodovanosti in intenzitetami. Ob vpeljavi dveh parametrov (indeksa ranljivosti in indeksa duktilnosti) so predlagali analitično funkcijo za krivulje ranljivosti:

$$\mu_D = 2.5 \left[1 + \tanh \left(\frac{I + 6.25V - 13.1}{Q} \right) \right]. \quad (51)$$

Pri tem so:

I intenziteta skladno z EMS-98,

V indeks ranljivosti,

Q indeks duktilnosti.

Za osnovne tipe objektov, ki so v EMS-98 opredeljene z vrsto konstrukcijskega sistema in razredom ranljivosti, so bile določene vrednosti parametrov V in Q . Kasneje je bila metodologija razširjena na več tipov oziroma podtipov objektov, pri čemer so bile vrednosti parametrov V in Q določene s primerjavo z drugimi metodami in primerjavo z dejansko poškodovanimi objekti.

Do tu so objekti obravnavani na nivoju tipologije objektov, z vpeljavo modifikatorjev vrednosti osnovnih parametrov pa je metodo mogoče uporabiti tudi na nivoju posameznih objektov. V ta namen se osnovne (tipološke) vrednosti indeksa ranljivosti V_0 modificira z modifikatorji V_k , ki odražajo vpliv specifičnih karakteristik objekta, kot so kvaliteta materialov, pravilnost zasnove, stopnja poškodovanosti ipd.:

$$V = V_0 + \sum V_k. \quad (52)$$

Modifikacijske vrednosti so določene empirično, na podlagi opazovanja poškodb dejanskih objektov. Vrednosti parametrov so prikazane v preglednici 14.

Preglednica 14: Osnovni parametri V_0 , Q in modifikacijske vrednosti V_k (Lagomarsino et al., 2004b, str. 7 in Lagomarsino, 2006, str. 454)Table 14: Basic parameters V_0 , Q and modifying scores V_k (Lagomarsino et al., 2004b, p. 7 and Lagomarsino, 2006, p. 454)

Osnovni parametri		
Cerkve	$Q = 3.0$	$V_0 = 0.89$
Kapele	$Q = 3.0$	$V_0 = 0.77$
Splošni modifikatorji V_k za kulturnozgodovinske objekte		
Vzdrževanje objekta	zelo slabo	$V_k = 0.08$
	slabo	$V_k = 0.04$
	srednje	$V_k = 0$
	dobro	$V_k = -0.04$
Kvaliteta zidovja	slaba	$V_k = 0.04$
	srednja	$V_k = 0$
	dobra	$V_k = -0.04$
Utrditveni ukrepi	učinkoviti utrditveni ukrepi	$V_k = -0.08$
Morfologija terena	greben	$V_k = 0.08$
	pobočje	$V_k = 0.04$
	ravnina	$V_k = 0$
Dodatni modifikatorji V_k za cerkve		
Tlorisna zasnova	triladijska	$V_k = 0.02$
	enoladijska	$V_k = 0$
	središčna	$V_k = -0.02$
Dvigajoči se elementi ali fasade	da	$V_k = 0.04$
	ne	$V_k = 0$
Legla glede na sosednje objekte	priključena	$V_k = 0.02$
	samosojna	$V_k = 0$
	vkjučena	$V_k = -0.02$
Oboki ali kupola	da	$V_k = 0.04$
	ne	$V_k = 0$
Višina stranskih zidov	večja od 12 m	$V_k = 0.04$
	med 6 in 12 m	$V_k = 0$
	manjša od 6 m	$V_k = -0.02$

Iz preglednice je razvidno, da slabo vzdrževanje objektov povečuje njihovo ranljivost. Faktorji morfologije terena kažejo, da so najbolj ranljivi objekti na grebenih, najmanj pa na ravnini. Glede tlorisne zasnove so najbolj ranljive cerkve z večladijsko zasnovo, najmanj pa s cerkve središčno zasnovo in kapele, kar potrjuje tudi naša analiza s poenostavljenimi indeksi za cerkve, obravnavana v prejšnjih poglavjih. Sosednji objekti lahko vplivajo ugodno, če je objekt umeščen znotraj niza objektov, ali neugodno, če je objekt umeščen v vogalu niza. Prisotnost obokov in kupol vpliva neugodno. Neugodno vpliva tudi velika višina objekta.

4.6.2 Analiza in rezultati

Metoda je neposredno uporabna za potrebe zastavljene naloge, pri čemer pa se zavedamo, da so modifikacijski faktorji izpeljani za italijanske cerkve, ki se lahko nekoliko razlikujejo od slovenskih. Ker ne razpolagamo z večjim naborom objektov, ki bi bili poškodovani zaradi potresa, verifikacija predlaganih parametrov v okviru naloge ni možna. Zato pri analizi privzamemo predlagane vrednosti (preglednica 14).

Edina težava je v tem, da se metoda glede potresnega vpliva nanaša na lestvico intenzitete EMS-98, v našem prostoru pa je v uporabi predvsem karta potresne nevarnosti, kjer je potresni vpliv izražen s projektnimi pospeški temeljnih tal. Načeloma bi za določitev potresnega vpliva lahko upoštevali karto intenzitete EMS-98, vendar pa se predvsem zaradi lažje primerjave rezultatov z drugimi obravnavanimi metodami odločimo za uporabo karte potresne nevarnosti in pretvorbo projektnih pospeškov temeljnih tal v intenziteto. Poleg tega to omogoča uporabo enakih faktorjev pomembnosti objektov, ki smo jih privzeli na začetku.

Za zvezo med intenziteto in pospeškom temeljnih tal uporabimo enačbo, ki je tudi sicer uporabljena v okviru metodologije RISK-UE pri primerjavi makroseizmičnega in mehničnega pristopa:

$$a_g = c_1 \cdot c_2^{I-5}, \quad (53)$$

$$I = 5 + \frac{1}{\ln c_2} (\ln a_g - \ln c_1), \quad (54)$$

kjer so:

a_g pospešek temeljnih tal,

I intenziteta,

c_1 vrednost pospeška temeljnih tal, ki ustreza referenčni intenziteti,

c_2 koeficient, ki izraža stopnjo povečanja pospeška s povečanjem intenzitete.

Pri določitvi intenzitete upoštevamo vrednost referenčnega pospeška temeljnih tal pomnoženega s faktorjem pomembnosti γ in faktorjem zemljine S . Za vrednosti parametrov upoštevamo $c_1 = 0.025$ in $c_2 = 1.8$, kot je to privzeto v (Calvi, Cecchi, 2007). Pričakovano intenziteto za posamezen objekt tako izračunamo z enačbo (55):

$$I = 5 + \frac{1}{\ln 1.8} (\ln a_d - \ln 0.025), \quad (55)$$

kjer upoštevamo

$$a_d = \gamma_I \cdot S \cdot a_{gR}. \quad (56)$$

Za vse obravnavane objekte smo z enačbo (52) izračunali indekse ranljivosti V (preglednica 15). Vrednosti indeksov znašajo od 0.75 do 1.11. Najnižje vrednosti dosegajo nizki objekti z enoladijsko ali centralno tlorisno zasnovo: Koper - Krstilnica sv. Janeza Krstnika ($V = 0.75$), Hrastovlje - Cerkev sv. Trojice ($V = 0.81$), Selo na Goričkem - Cerkev sv. Nikolaja ($V = 0.83$). Najvišje vrednosti ranljivosti dosegajo visoke triladijske ali enoladijske cerkve: Drežnica - Cerkev sv. Srca Jezusovega ($V = 1.11$), Kobarid - Cerkev sv. Antona Padovanskega ($V = 1.05$), pa tudi visoki objekti s centralno zasnovo, kot je: Nova Štifta - Cerkev Marijinega vnebovzetja ($V = 1.11$).

V nadaljevanju smo z uporabo enačbe (51) izračunali povprečne vrednosti poškodovanosti μ_D za dane intenzitete izračunane iz projektnih pospeškov temeljnih tal (55). Objekte je mogoče enostavno razvrstiti glede na pričakovane povprečne vrednosti poškodovanosti μ_D , hkrati pa rezultat ponuja tudi informacijo o stopnji poškodovanosti pri pričakovanem potresu. Izračunane vrednosti μ_D se za obravnavane objekte gibljejo od 1.89 do 4.40. Najnižje vrednosti dosegajo objekti z nizkim indeksom ranljivosti v območjih nizke seizmičnosti: Koper - Krstilnica sv. Janeza Krstnika ($\mu_D = 1.89$), Selo na Goričkem - Cerkev sv. Nikolaja ($\mu_D = 2.30$), Hrastovlje - Cerkev sv. Trojice ($\mu_D = 2.51$). Za te cerkve bi lahko sklepali, da potresno niso ogrožene, saj se ob projektnem potresu pričakujejo majhne poškodbe. Za potresno zelo ogrožene se izkažejo: Ljubljana - Cerkev sv. Jakoba ($\mu_D = 4.40$), Ljubljana - Cerkev sv. Petra ($\mu_D = 4.36$), Drežnica - Cerkev sv. Srca Jezusovega ($\mu_D = 4.36$), saj se ob projektnem potresu pričakujejo močne poškodbe.

Tu se zastavlja vprašanje, katera stopnja poškodovanosti objekta je še sprejemljiva, torej takšna, da preventivni ukrepi niso potrebni. Če privzamemo terminologijo standarda EC8, sta kriterija dva: prvi predstavlja zahtevo po neporušitvi (mejno stanje nosilnosti), drugi pa zahtevo po omejitvi poškodb (mejno stanje uporabnosti). V okviru naloge preverjamo samo mejno stanje nosilnosti. Za mejno vrednost poškodovanosti predpostavimo $\mu_{D,MSN} = 3.5$, kar ustreza poškodovanosti med 3. in 4. stopnjo po EMS-98 lestvici. Ob tej predpostavki je potresno ogroženih, torej takšnih, kjer pričakovane poškodbe ogrožajo varnost konstrukcije, 56 % obravnavanih objektov.

V okviru metodologije RISK-UE je predstavljena tudi primerjava med makroseizmičnim in mehaničnim pristopom, ki temelji na predpostavljeni zvezi med pospeškom in intenziteto (53). Za izbrano povprečno vrednost poškodovanosti $\mu_{D,MSN}$ lahko iz enačbe (51) intenziteto I izrazimo kot funkcijo indeksa ranljivosti V . Če to vstavimo v enačbo (53), dobimo zvezo za mejni pospešek temeljnih tal a_{MSN} , ki povzroči stopnjo poškodovanosti $\mu_{D,MSN}$ v odvisnosti od indeksa ranljivosti V . Za mejno stopnjo poškodovanosti $\mu_{D,MSN} = 3.5$ ter parametra $c_1 = 0.025$, $c_2 = 1.8$ dobimo sledečo zvezo:

$$a_{MSN} = 0.025 \cdot 1.8^{9.37 - 6.25 \cdot V} . \quad (57)$$

Izračunani mejni pospešek a_{MSN} lahko primerjamo z zahtevami potresa – projektnim pospeškom a_d v smislu indeksa potresne ogroženosti:

$$I_R = \frac{a_d}{a_{MSN}} . \quad (58)$$

Mejni pospeški a_{MSN} se za obravnavane objekte gibljejo od 0.10 do 0.39 g, indeksi potresne ogroženosti pa od 0.31 do 2.76. Število potresno ogroženih objektov je po tej primerjavi seveda enako

kot pri primerjavi pričakovanih in mejnih vrednosti poškodovanosti, je pa primerjava mejnih in projektnih pospeškov za inženirsko presojo bolj primerna. Če je tako pri najbolj ogroženem objektu (Ljubljana - Cerkev sv. Jakoba) pričakovana povprečna poškodovanost μ_D za 26 % večja od mejne poškodovanosti $\mu_{D,MSN}$, bi to v smislu primerjave obremenitve z nosilnostjo pomenilo prekoračitev za 176 %.

Preglednica 15: Račun indeksov za cerkve po metodi RISK-UE, 1. nivo

Table 15: Calculation of indexes for churches according to 1st level of RISK-UE methodology

Št.	Ime enote	V	Q	α_d [g]	I_{EMS-98} (α_d)	μ_d	α_{MSN} [g]	$I_{R-RISK.1}$
1	Bled - Blejski grad, kapela sv. Ingenuina in Albuina	0.87	3.00	0.21	8.62	3.27	0.25	0.83
2	Bled - Cerkev Marijinega vnebovzetja	0.97	3.00	0.21	8.62	3.71	0.17	1.20
3	Bohinj - Cerkev sv. Janeza Krstnika	0.87	3.00	0.24	8.85	3.44	0.25	0.95
4	Bovec - Cerkev sv. Urha	1.01	3.00	0.32	9.36	4.24	0.15	2.15
5	Brezje - Cerkev sv. Vida (Marija Pomagaj)	0.93	3.00	0.24	8.85	3.69	0.20	1.19
6	Brežice - Cerkev sv. Roka	0.93	3.00	0.22	8.67	3.58	0.20	1.07
7	Celje - Cerkev sv. Danijela	0.95	3.00	0.22	8.67	3.66	0.19	1.15
8	Crngrob - Cerkev Marijinega oznanjenja	0.99	3.00	0.27	9.05	4.03	0.16	1.66
9	Čezsoča - Cerkev sv. Antona Puščavnika	0.97	3.00	0.18	8.36	3.53	0.17	1.03
10	Drežnica - Cerkev sv. Srca Jezusovega	1.11	3.00	0.27	9.05	4.36	0.10	2.59
11	Gornji Grad - Cerkev sv. Mohorja in Fortunata	0.97	3.00	0.25	8.93	3.90	0.17	1.44
12	Groblje - Cerkev sv. Mohorja in Fortunata	0.87	3.00	0.27	9.05	3.58	0.25	1.07
13	Hrastovlje - Cerkev sv. Trojice	0.81	3.00	0.15	8.05	2.51	0.31	0.48
14	Javorca - Spominska cerkev. sv. Duha	0.93	3.00	0.19	8.47	3.44	0.20	0.95
15	Kamnica ob Dravi - Cerkev sv. Martina	0.89	3.00	0.12	7.67	2.61	0.23	0.51
16	Kanalski Lom - Cerkev sv. Primoža in Felicijana	0.97	3.00	0.24	8.85	3.85	0.17	1.37
17	Kobarid - Cerkev sv. Antona Padovanskega	1.05	3.00	0.27	9.05	4.21	0.13	2.07
18	Kočevje - Cerkev sv. Jerneja	0.91	3.00	0.18	8.36	3.26	0.22	0.83
19	Komen - Cerkev Marijinega vnebovzetja	0.93	3.00	0.18	8.36	3.36	0.20	0.89
20	Koper - Cerkev Marijinega vnebovzetja	1.03	3.00	0.14	7.98	3.53	0.14	1.03
21	Koper - Krstilnica sv. Janeza Krstnika	0.75	3.00	0.12	7.67	1.89	0.39	0.31
22	Krtina pri Domžalah - Cerkev sv. Lenarta in sv. Roka	0.95	3.00	0.22	8.67	3.66	0.19	1.15
23	Laško - Cerkev sv. Martina	0.91	3.00	0.22	8.67	3.49	0.22	0.99
24	Ljubljana - Cerkev Marijinega obiskanja na Rožniku	1.01	3.00	0.24	8.85	3.99	0.15	1.59
25	Ljubljana - Cerkev sv. Florijana	1.01	3.00	0.24	8.85	3.99	0.15	1.59
26	Ljubljana - Cerkev sv. Frančiška Asiškega v Šiški	0.81	3.00	0.36	9.54	3.66	0.31	1.16
27	Ljubljana - Cerkev sv. Jakoba	1.05	3.00	0.36	9.54	4.40	0.13	2.76
28	Ljubljana - Cerkev sv. Janeza Krstnika v Trnovem	0.99	3.00	0.30	9.23	4.12	0.16	1.85
29	Ljubljana - Cerkev sv. Nikolaja	0.93	3.00	0.36	9.54	4.09	0.20	1.78
30	Ljubljana - Cerkev sv. Petra	1.03	3.00	0.36	9.54	4.36	0.14	2.57
31	Log pri Vipavi - Cerkev Matere božje Tolažnice žalostnih	1.01	3.00	0.17	8.24	3.62	0.15	1.11
32	Maribor - Cerkev sv. Alojzija	1.03	3.00	0.14	7.98	3.53	0.14	1.03
33	Maribor - Cerkev sv. Janeza Krstnika	0.99	3.00	0.14	7.98	3.35	0.16	0.89
34	Martjanci - Cerkev sv. Martina	0.93	3.00	0.14	7.98	3.07	0.20	0.71
35	Mengore - Cerkev Imena Marijinega	1.01	3.00	0.19	8.47	3.77	0.15	1.27
36	Murska Sobota - Cerkev sv. Nikolaja	0.95	3.00	0.14	7.98	3.16	0.19	0.77
37	Nova Štifta - Cerkev Marijinega vnebovzetja	1.11	3.00	0.18	8.36	4.06	0.10	1.72
38	Olimje - Cerkev Marijinega vnebovzetja	0.87	3.00	0.22	8.67	3.31	0.25	0.86
39	Piran - Cerkev sv. Jurija	0.97	3.00	0.12	7.67	3.02	0.17	0.69
40	Postojna - Cerkev sv. Štefana	0.97	3.00	0.29	9.16	4.02	0.17	1.65
41	Predenca - Cerkev sv. Roka	1.05	3.00	0.14	7.98	3.62	0.13	1.11
42	Ptujska Gora - Cerkev Marije zaščitnice	1.03	3.00	0.18	8.36	3.78	0.14	1.28
43	Rogatec - Cerkev sv. Hiacinte	1.01	3.00	0.14	7.98	3.44	0.15	0.95

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 15

Št.	Ime enote	V	Q	a_d [g]	I_{EMS-98} (a_d)	μ_d	a_{MSN} [g]	$I_{R-RISK.1}$
44	Rogatec - Cerkev sv. Jerneja	0.95	3.00	0.22	8.67	3.66	0.19	1.15
45	Ruše - Cerkev Matere božje	0.93	3.00	0.14	7.98	3.07	0.20	0.71
46	Selo na Goričkem - Cerkev sv. Nikolaja	0.83	3.00	0.12	7.67	2.30	0.29	0.41
47	Sladka Gora - Cerkev Matere božje	0.93	3.00	0.18	8.36	3.36	0.20	0.89
48	Slovenj Gradec - Cerkev sv. Duha	0.93	3.00	0.12	7.67	2.82	0.20	0.59
49	Slovenj Gradec - Cerkev sv. Elizabete	0.89	3.00	0.14	7.98	2.87	0.23	0.61
50	Slovenske Konjice - Cerkev sv. Jurija	0.95	3.00	0.15	8.05	3.22	0.19	0.80
51	Smlednik - Cerkev sv. Urha	0.97	3.00	0.32	9.36	4.12	0.17	1.85
52	Suha pri Škofji Loki - Cerkev sv. Janeza Krstnika	0.89	3.00	0.32	9.36	3.86	0.23	1.38
53	Svete gore - Cerkev Matere božje	1.03	3.00	0.29	9.16	4.20	0.14	2.06
54	Svete gore - Kapela Lurške Matere božje	0.87	3.00	0.19	8.47	3.16	0.25	0.76
55	Svete gore - Kapela sv. Boštjana	0.91	3.00	0.19	8.47	3.35	0.22	0.88
56	Svete gore - Kapela sv. Jurija	0.91	3.00	0.19	8.47	3.35	0.22	0.88
57	Svete gore - Kapela sv. Martina	0.91	3.00	0.19	8.47	3.35	0.22	0.88
58	Šempas - Cerkev sv. Silvestra	0.95	3.00	0.25	8.93	3.82	0.19	1.34
59	Šmartno na Pohorju - Cerkev sv. Martina	0.97	3.00	0.14	7.98	3.26	0.17	0.82
60	Tolmin - Cerkev sv. Urha	0.93	3.00	0.19	8.47	3.44	0.20	0.95
61	Tunjice - Cerkev sv. Ane	0.99	3.00	0.27	9.05	4.03	0.16	1.66
62	Turnišče - Cerkev Marijinega vnebovzetja	0.93	3.00	0.14	7.98	3.07	0.20	0.71
63	Vipava - Cerkev sv. Štefana	0.93	3.00	0.25	8.93	3.75	0.20	1.25
64	Visoko pod Kureščkom - Cerkev sv. Nikolaja	0.95	3.00	0.19	8.47	3.52	0.19	1.02

4.7 Makroseizmična metoda RISK-UE 2. nivo

4.7.1 Opis metode

Splošen opis metodologije RISK-EU je podan v poglavju 3.1.2.3.3 pri pregledu literature. Drugi nivo makroseizmičnega pristopa te metodologije temelji na obravnavi posameznih delov objekta. Metoda je razvita predvsem na osnovi analize poškodb v potresih poškodovanih objektov. Ta je pokazala ponavljajoče se poškodbe in porušne mehanizme, ki običajno ne vključujejo celotnega objekta, temveč so omejeni na določeno območje oziroma skupek arhitektonskih elementov – makroelementov, ki se pri potresu obnašajo skoraj neodvisno od drugih delov objekta. Metoda je bila razvita predvsem za potrebe hitrega ocenjevanja poškodovanosti in potresne ranljivost objektov po potresu, možno pa jo je uporabiti tudi za nepoškodovane objekte. Metoda je bila prvič uporabljena po potresih v italijanskih pokrajinah Umbria in Marke leta 1997, kjer je bilo obravnavano več kot 1000 cerkva (Lagomarsino, 1998). Ob ugotovitvah kasnejših potresov so avtorji metodo nekoliko korigirali oziroma nadgradili. V okviru naloge uporabimo verzijo metode opisano v (Lagomarsino et al. 2004a, Calvi, Cecchi, 2007).

Določitev potresne ranljivosti objekta zahteva detajlni vizualni pregled objekta, v sklopu katerega je potrebno identificirati možne porušne mehanizme, nato pa se za vsak mehanizem ugotavlja prisotnost indikatorjev potresne ranljivosti in prisotnost protipotresnih indikatorjev, ki zmanjšujejo ranljivost. Indeks ranljivosti objekta se izračuna kot normirana vsota ranljivosti posameznih porušnih mehanizmov, pomnoženimi z utežmi glede na njihovo relativno pomembnost:

$$i_v = \frac{1}{6} \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k (v_{ki} - v_{kp})}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k} + \frac{1}{2}. \quad (59)$$

Oznake pomenijo:

- i_v indeks potresne ranljivosti objekta (0–1.0),
- ρ_k faktor pomembnosti k -tega porušnega mehanizma (0.5–1.0),
- v_{ki} vrednost indikatorja potresne ranljivosti k -tega porušnega mehanizma (1–3),
- v_{kp} vrednost protipotresnega indikatorja k -tega porušnega mehanizma (1–3).

Metoda predpostavlja 28 možnih porušnih mehanizmov. Pri vsakem mehanizmu je podan faktor pomembnosti ρ_k , ki izraža relativno pomembnost mehanizma. Za nekatere mehanizme je faktor pomembnosti predpisan, pri nekaterih pa je omogočena izbira ocenjevalca znotraj predpisanega intervala. V kolikor makroelement, na katerega se mehanizem nanaša, ne nastopa, je vrednost faktorja enaka nič. Pri vsakem mehanizmu so opisani indikatorji potresne ranljivosti in protipotresni indikatorji (preglednica 17). Vrednosti indikatorjev ranljivosti v_{ki} in protipotresnih indikatorjev v_{kp} se za posamezen mehanizem določi glede na število indikatorjev ter glede na oceno njihove učinkovitosti (preglednica 16). Poudarjeno je, da je mogoče dodajati tudi nove indikatorje za potrebe posebnosti posameznih cerkva.

Avtorji (Lagomarsino et al. 2004b) podajajo tudi zvezo med indeksom ranljivosti i_v in indeksom ranljivosti V , ki se uporablja pri metodi na 1. nivoju (prejšnje poglavje):

$$V = 0.67 + 0.55 \cdot i_v. \quad (60)$$

To omogoča določitev povprečne vrednosti poškodovanosti μ_D v odvisnosti od intenzitete I (51) in določitev mejnega pospeška, ki povzroči določeno povprečno poškodovanost z uporabo enačbe (53).

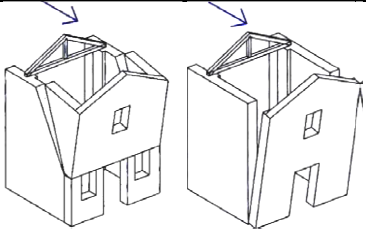
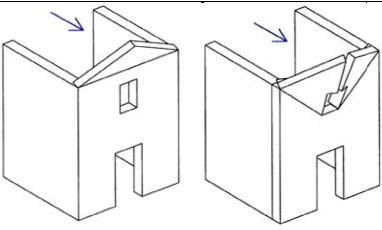
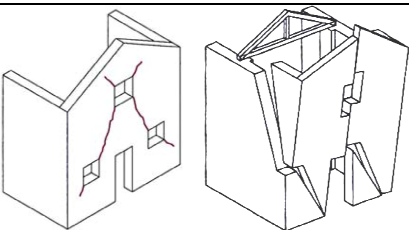
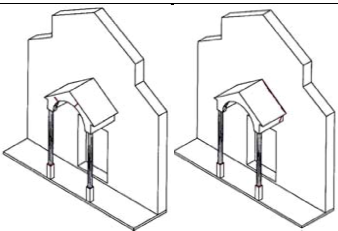
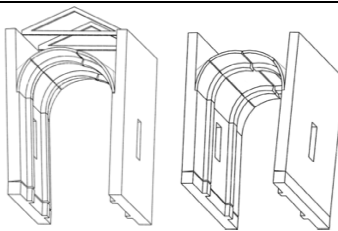
Preglednica 16: Določitev vrednosti indikatorjev ranljivosti in vrednosti protipotresnih indikatorjev za posamezen porušni mehanizem (Calvi, Cecchi, 2007: str. 46)

Table 16: Evaluation of the vulnerability indicators and anti-seismic indicators of each damage mechanism (Calvi, Cecchi, 2007: p. 46)

Število indikatorjev potresne ranljivosti ali protipotresnih indikatorjev	Ocena učinkovitosti indikatorjev	Vrednost indikatorjev v_{ki} ali v_{kp}
vsaj 1	3	3
vsaj 2	2	3
1	2	2
vsaj 2	1	2
1	1	1
nič	0	0

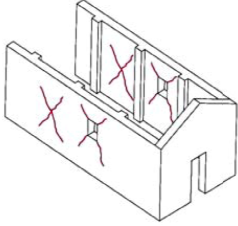
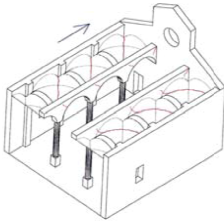
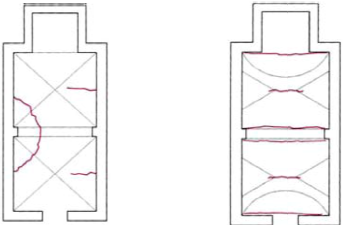
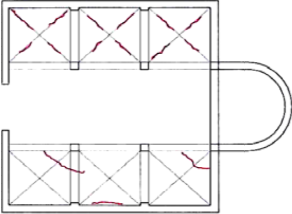
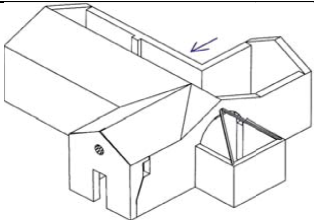
Preglednica 17: Porušni mehanizmi za cerkve (Calvi, Cecchi, 2007)

Table 17: Collapse mechanisms for churches (Calvi, Cecchi, 2007)

<p>1. Prevrnitev čelne fasade</p> 	<p>Opis poškodb: ločitev (čelne) fasade od stranskih zidov; odklon iz vertikale Faktor pomembnosti: $\rho = 1$ Indikatorji ranljivosti:</p> <ul style="list-style-type: none"> • elementi razrivanja (špirovci, oboki, loki) • velike odprtine na stranskih zidovih v bližini vogalov <p>Protipotresni indikatorji:</p> <ul style="list-style-type: none"> • vzdolžne vezi • oporni zidovi, naslanjanje na sosednje zgradbe
<p>2. Poškodbe na vrhu čelne fasade</p> 	<p>Opis poškodb: prevrnitev zatrepa s formiranjem horizontalnih ali »V« razpok; razčlenitev zidovja; premaknitev (strešnih) nosilcev; zasuki povezja Faktor pomembnosti: $\rho = 1$ Indikatorji ranljivosti:</p> <ul style="list-style-type: none"> • velike odprtine (rozete) • velik in težak zatrejni zid (timpanon) • toge (AB) vezi, težka (AB) streha <p>Protipotresni indikatorji:</p> <ul style="list-style-type: none"> • lokalna povezava s streho • zavetrovanje strehe • lahke zidne vezi (jeklne vezi, armirano zidovje, drugo)
<p>3. Strižni mehanizem čelne fasade</p> 	<p>Opis poškodb: diagonalne (strižne) razpoke; vertikalne ali ločne razpoke (zasuki); druge oblike razpok ali izbočenje Faktor pomembnosti: $\rho = 1$ Indikatorji ranljivosti:</p> <ul style="list-style-type: none"> • velike ali številne odprtine (tudi če so zapolnjene) • vitki vertikalni elementi <p>Protipotresni indikatorji:</p> <ul style="list-style-type: none"> • vezi na notranji strani • naslanjanje na sosednje zgradbe
<p>4. Poškodbe narteksa</p> 	<p>Opis poškodb: razpoke v lokih, prekladah ali nosilcih zaradi zasuka stebrov; ločitev od fasade; Faktor pomembnosti: $\rho = 0.5 - 1.0$ Indikatorji ranljivosti:</p> <ul style="list-style-type: none"> • elementi razrivanja (oboki, loki) <p>Protipotresni indikatorji:</p> <ul style="list-style-type: none"> • vezi • ustrezne dimenzije stebrov
<p>5. Prečne vibracije ladje</p> 	<p>Opis poškodb: razpoke v prečnih lokih (se lahko nadaljujejo v oboke); zasuki vzdolžnih zidov; strižne razpoke v obokih; odklon stebrov iz vertikale ali porušitev stebrov Faktor pomembnosti: $\rho = 1.0$ Indikatorji ranljivosti:</p> <ul style="list-style-type: none"> • zelo tanke stene • oboki, loki <p>Protipotresni indikatorji:</p> <ul style="list-style-type: none"> • pilastri ali zunanji oporni zidovi • naslanjanje na sosednje zgradbe • prečne (natezne) vezi

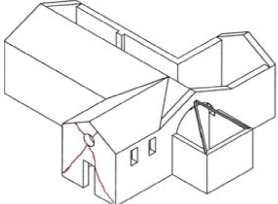
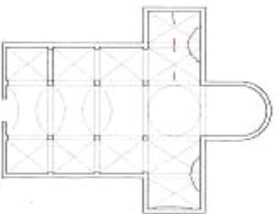
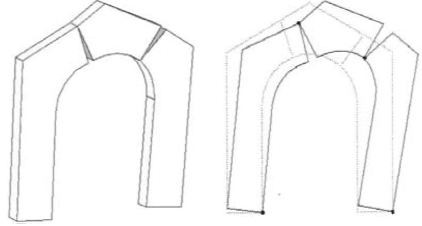
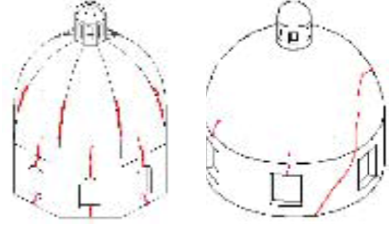
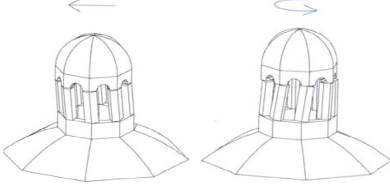
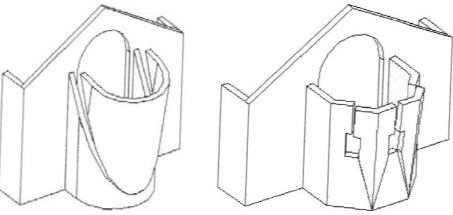
se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 17

6. Strižni mehanizem v vzdolžnih zidovih	
	<p>Opis poškodb: diagonalne razpoke (enojne ali križne); razpoke na robovih zidov</p> <p>Faktor pomembnosti: $\rho = 1.0$</p> <p>Indikatorji ranljivosti:</p> <ul style="list-style-type: none"> • velike odprtine ali široka območja z majhno debelino zidov • zelo toge (AB) vezi, težka (AB) streha <p>Protipotresni indikatorji:</p> <ul style="list-style-type: none"> • dobra kvaliteta zidovja (brez faznosti gradnje) • ustrezne preklade nad odprtinami • lahke zidne vezi (jeklene vezi, armirano zidovje, drugo)
7. Vzdolžni odziv kolonade	
	<p>Opis poškodb: razpoke v lokih in/ali v vzdolžnih arhitravih (prekladah); razpoke in/ali drobljenje ob vpetju stebrov; strižne razpoke v obokih ali stranskih ladjah</p> <p>Faktor pomembnosti: $\rho = 1.0$</p> <p>Indikatorji ranljivosti:</p> <ul style="list-style-type: none"> • težki oboki nad glavno ladjo • težka (AB) streha, težka (AB) obloga obokov <p>Protipotresni indikatorji:</p> <ul style="list-style-type: none"> • vzdolžne vezi • oporni zidovi (čelne) fasade
8. Oboki glavne ladje	
	<p>Opis poškodb: razpoke v oboku glavne ladje; ločitev obokov od lokov</p> <p>Faktor pomembnosti: $\rho = 1.0$</p> <p>Indikatorji ranljivosti:</p> <ul style="list-style-type: none"> • koncentrirana obtežba iz strešne konstrukcije • tanki oboki, predvsem pri velikih razponih • lunete ali prekinitve in nepravilnosti ob straneh obokov <p>Protipotresni indikatorji:</p> <ul style="list-style-type: none"> • učinkovito nameščene vezi • zunanji ali notranji oporni zidovi
9. Oboki stranske ladje	
	<p>Opis poškodb: razpoke v obokih stranske ladje; ločitev obokov od lokov ali zidov</p> <p>Faktor pomembnosti: $\rho = 1.0$</p> <p>Indikatorji ranljivosti:</p> <ul style="list-style-type: none"> • koncentrirana obtežba iz strešne konstrukcije • tanki oboki, predvsem pri velikih razponih • lunete ali prekinitve in nepravilnosti ob straneh obokov <p>Protipotresni indikatorji:</p> <ul style="list-style-type: none"> • učinkovito nameščene vezi • zunanji ali notranji oporni zidovi
10. Prevrnitev čelne fasade prečne ladje	
	<p>Opis poškodb: ločitev čelnega zidu od stranskih zidov; prevrnitev ali premaknitev zatrepa</p> <p>Faktor pomembnosti: $\rho = 0.5 - 1.0$</p> <p>Indikatorji ranljivosti:</p> <ul style="list-style-type: none"> • toge (AB) vezi, težka (AB) streha • velike odprtine na fasadi (rozete) ali na stranskih zidovih v bližini vogalov • težak zatrepi zid (timpanon) <p>Protipotresni indikatorji:</p> <ul style="list-style-type: none"> • vezi (natezne) • oporni zidovi, naslanjanje na sosednje zgradbe • dobra povezava s strešno konstrukcijo (vezi, zavetrovanje) • dobra povezava zidov v vogalih • lahke zidne vezi (jeklene vezi, armirano zidovje, drugo)

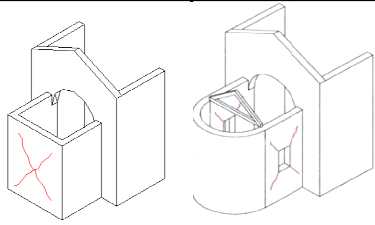
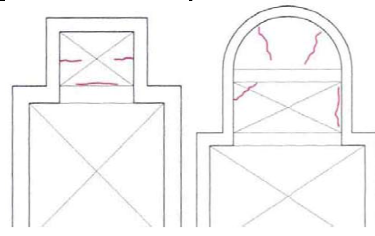
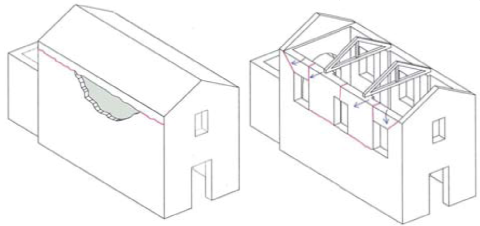
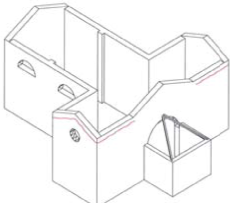
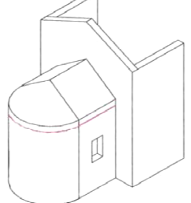
se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 17

	<p>11. Strižni mehanizem čelne fasade prečne ladje</p> <p>Opis poškodb: diagonalne razpoke (enojne ali križne); razpoke na robovih zidov</p> <p>Faktor pomembnosti: $\rho = 0.5 - 1.0$</p> <p>Indikatorji ranljivosti:</p> <ul style="list-style-type: none"> • toge (AB) vezi, težka (AB) streha • velike odprtine ali široka območja z majhno debelino zidov <p>Protipotresni indikatorji:</p> <ul style="list-style-type: none"> • dobra kvaliteta zidovja (brez faznosti gradnje) • ustrezne preklade nad odprtinami • lahke zidne vezi (jeklene vezi, armirano zidovje, drugo)
	<p>12. Oboki prečne ladje</p> <p>Opis poškodb: razpoke v oboku; ločitev obokov od lokov ali zidov</p> <p>Faktor pomembnosti: $\rho = 0.5 - 1.0$</p> <p>Indikatorji ranljivosti:</p> <ul style="list-style-type: none"> • koncentrirana obtežba iz strešne konstrukcije • tanki oboki, predvsem pri velikih razponih • lunete ali prekinitve in nepravilnosti ob straneh obokov <p>Protipotresni indikatorji:</p> <ul style="list-style-type: none"> • učinkovito nameščene vezi • zunanji ali notranji oporni zidovi
	<p>13. Slavolok</p> <p>Opis poškodb: razpoke v loku; zdrs med kamnitimi gradniki (klesanci); drobljenje ali horizontalne razpoke ob vpetju stebrov</p> <p>Faktor pomembnosti: $\rho = 1.0$</p> <p>Indikatorji ranljivosti:</p> <ul style="list-style-type: none"> • težka (AB) streha • kupola, tambur <p>Protipotresni indikatorji:</p> <ul style="list-style-type: none"> • čokati stranski zidovi (majhen razpon loka glede na širino ladje) • učinkovito nameščene (natezne) vezi • dobra kvaliteta zidovja (klesanci) in/ali ustrezna debelina loka
	<p>14. Kupola, tambur (boben)</p> <p>Opis poškodb: razpoke v kupoli (lahko se nadaljujejo v tambur)</p> <p>Faktor pomembnosti: $\rho = 1.0$</p> <p>Indikatorji ranljivosti:</p> <ul style="list-style-type: none"> • velike odprtine v tamburju • koncentrirane sile iz strešne konstrukcije <p>Protipotresni indikatorji:</p> <ul style="list-style-type: none"> • obodne vezi v različnih višinah • oporni zidovi ali pilastri v tamburju • kupola brez tamburja
	<p>15. Laterna (svetlobnica)</p> <p>Opis poškodb: razpoke v kupoli laterne, zasuk ali premaknitev stebrov</p> <p>Faktor pomembnosti: $\rho = 0.5$</p> <p>Indikatorji ranljivosti:</p> <ul style="list-style-type: none"> • velike odprtine in vitki stebri laterne <p>Protipotresni indikatorji:</p> <ul style="list-style-type: none"> • (natezne) vezi ali obodne vezi • oporni zidovi ali pilastri • majhna velikost glede na kupolo
	<p>16. Prevrnitev apside</p> <p>Opis poškodb: vertikalne ali ukrivljene razpoke v zidovih apside (vertikalne razpoke v poligonalnih apsidah, »U« razpoke v polkrožnih apsidah);</p> <p>Faktor pomembnosti: $\rho = 1$</p> <p>Indikatorji ranljivosti:</p> <ul style="list-style-type: none"> • oslabitve zaradi odprtin • elementi razrivanja (oboki) • toge (AB) vezi, težka (AB) streha <p>Protipotresni indikatorji:</p> <ul style="list-style-type: none"> • obodne vezi (polkr. ali polig. apside) ali natezne vezi (pravokotne apside) • oporni zidovi, naslanjanje na sosednje zgradbe • nerazrivajoča, zavetrovana streha

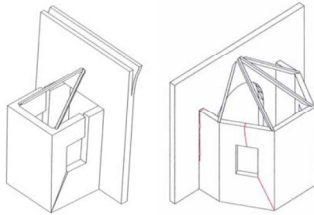
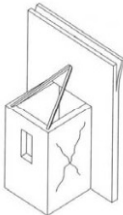
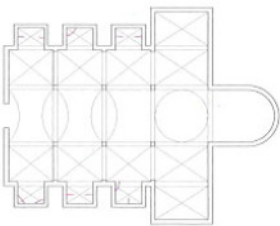
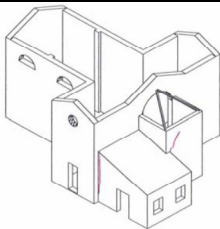
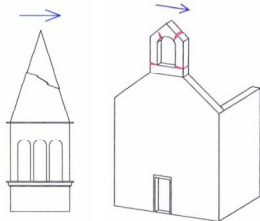
se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 17

17. Strižni mehanizem prezbiterija in apside	
	<p>Opis poškodb: diagonalne razpoke (enojne ali križne); razpoke na robovih zidov</p> <p>Faktor pomembnosti: $\rho = 1$</p> <p>Indikatorji ranljivosti:</p> <ul style="list-style-type: none"> • toge (AB) vezi, težka (AB) streha • velike odprtine ali območja z majhno debelino zidov <p>Protipotresni indikatorji:</p> <ul style="list-style-type: none"> • dobra kvaliteta zidovja (brez faznosti gradnje) • ustrezne preklade nad odprtinami • lahke zidne vezi (jeklene vezi, armirano zidovje, drugo)
18. Oboki prezbiterija oziroma apside	
	<p>Opis poškodb: razpoke v obokih; ločitev obokov od lokov ali zidov</p> <p>Faktor pomembnosti: $\rho = 0.5 - 1.0$</p> <p>Indikatorji ranljivosti:</p> <ul style="list-style-type: none"> • koncentrirana obtežba iz strešne konstrukcije • tanki oboki, predvsem pri velikih razponih • lunete ali prekinitve in nepravilnosti ob straneh obokov <p>Protipotresni indikatorji:</p> <ul style="list-style-type: none"> • učinkovito nameščene (natezne) vezi • zunanji ali notranji oporni zidovi
19. Mehanizmi strehe: vzdolžni zidovi glavne in stranskih ladij	
	<p>Opis poškodb: razpoke v bližini ležišč lesenih nosilcev; zdrs nosilcev; ločitev (AB) vezi od zidovja; močno razslojevanje fasadnega sloja</p> <p>Faktor pomembnosti: $\rho = 1.0$</p> <p>Indikatorji ranljivosti:</p> <ul style="list-style-type: none"> • sile iz strešne konstrukcije • toge (AB) vezi, težka (AB) streha <p>Protipotresni indikatorji:</p> <ul style="list-style-type: none"> • lahke zidne vezi (jeklene vezi, armirano zidovje, drugo) • dobra povezava nosilcev z zidovi • zavterovano ostrešje • dobra povezava elementov ostrešja
20. Mehanizmi strehe: prečna ladja	
	<p>Opis poškodb: razpoke v bližini ležišč lesenih nosilcev; zdrs nosilcev; ločitev (AB) vezi od zidovja; močno razslojevanje fasadnega sloja</p> <p>Faktor pomembnosti: $\rho = 0.5 - 1.0$</p> <p>Indikatorji ranljivosti:</p> <ul style="list-style-type: none"> • sile iz strešne konstrukcije • toge (AB) vezi, težka (AB) streha <p>Protipotresni indikatorji:</p> <ul style="list-style-type: none"> • lahke zidne vezi (jeklene vezi, armirano zidovje, drugo) • dobra povezava nosilcev z zidovi • zavterovano ostrešje • dobra povezava elementov ostrešja
21. Mehanizmi strehe: apside in prezbiterij	
	<p>Opis poškodb: razpoke v bližini ležišč lesenih nosilcev; zdrs nosilcev; ločitev (AB) vezi od zidovja; močno razslojevanje fasadnega sloja</p> <p>Faktor pomembnosti: $\rho = 1.0$</p> <p>Indikatorji ranljivosti:</p> <ul style="list-style-type: none"> • sile iz strešne konstrukcije • toge (AB) vezi, težka (AB) streha <p>Protipotresni indikatorji:</p> <ul style="list-style-type: none"> • lahke zidne vezi (jeklene vezi, armirano zidovje, drugo) • dobra povezava nosilcev z zidovi • zavterovano ostrešje • dobra povezava elementov ostrešja

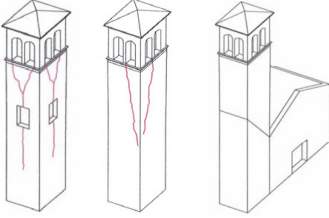
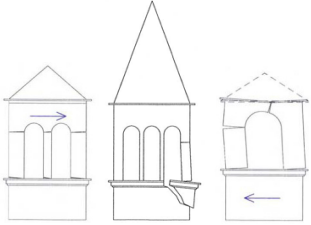
se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 17

22. Prevrnitev kapele	
	<p>Opis poškodb: ločitev čelnih in stranskih zidov</p> <p>Faktor pomembnosti: $\rho = 0.5 - 1.0$</p> <p>Indikatorji ranljivosti:</p> <ul style="list-style-type: none"> • velike oslavitve zaradi odprtih <p>Protipotresni indikatorji:</p> <ul style="list-style-type: none"> • oporni zidovi, naslanjanje na sosednje zgradbe • dobra povezava zidov v vogalih
23. Strižni mehanizem v zidovih kapele	
	<p>Opis poškodb: diagonalne razpoke (enojne ali križne); razpoke na robovih zidov</p> <p>Faktor pomembnosti: $\rho = 0.5 - 1.0$</p> <p>Indikatorji ranljivosti:</p> <ul style="list-style-type: none"> • toge (AB) vezi, težka (AB) streha • velike odprtine ali območja z majhno debelino zidov <p>Protipotresni indikatorji:</p> <ul style="list-style-type: none"> • dobra kvaliteta zidovja (brez faznosti gradnje) • ustrezne preklade nad odprtiniami • lahke zidne vezi (jeklne vezi, armirano zidovje, drugo)
24. Oboki kapel	
	<p>Opis poškodb: razpoke v obokih; ločitev obokov od lokov ali zidov</p> <p>Faktor pomembnosti: $\rho = 0.5 - 1.0$</p> <p>Indikatorji ranljivosti:</p> <ul style="list-style-type: none"> • koncentrirana obtežba iz strešne konstrukcije • tanki oboki, predvsem pri velikih razponih • lunete ali prekinitve in nepravilnosti ob straneh obokov <p>Protipotresni indikatorji:</p> <ul style="list-style-type: none"> • učinkovito nameščene vezi • zunanji ali notranji oporni zidovi
25. Interakcija s sosednjimi zgradbami	
	<p>Opis poškodb: premiki v stičnih regah; razpoke v zidovih zaradi medsebojnih trkov objektov</p> <p>Faktor pomembnosti: $\rho = 0.5 - 1.0$</p> <p>Indikatorji ranljivosti:</p> <ul style="list-style-type: none"> • velika razlika v togosti med objektoma • možnost koncentracije potresnih sil na stikih <p>Protipotresni indikatorji:</p> <ul style="list-style-type: none"> • ustrezna povezava zidov različnih faz gradnje • povezava z vezmi
26. Štrline (zatrep zvonika, preslica, fiala, kipi)	
	<p>Opis poškodb: Trajna premaknitev ali zasuk; razpoke</p> <p>Faktor pomembnosti: $\rho = 0.8$</p> <p>Indikatorji ranljivosti:</p> <ul style="list-style-type: none"> • zelo tanki elementi • previsna podpora • nesimetrična lega glede na spodnjo konstrukcijo <p>Protipotresni indikatorji:</p> <ul style="list-style-type: none"> • ustrezna povezava s spodnjo konstrukcijo • elementi majhnih dimenzij • monolitno zidovje (pravilni klesanci)

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 17

<p>27. Zvonik</p> 	<p>Opis poškodb: razpoke v območju stika zvonika in cerkve; strižne razpoke ali zdrs; vertikalne ali ukrivljene razpoke (izbočenje enega ali več vogalov)</p> <p>Faktor pomembnosti: $\rho = 1.0$</p> <p>Indikatorji ranljivosti:</p> <ul style="list-style-type: none"> • velike odprtine na različnih višinah • nesimetrično podprto ob vpetju • nepravilni podporni elementi na nivoju tal (lok na eni strani) <p>Protipotresni indikatorji:</p> <ul style="list-style-type: none"> • dobra, homogena kvaliteta zidovja (brez faznosti gradnje) • vezi v različnih višinah • dobra povezava z zidovi cerkve (če sta povezana)
<p>28. Odprtina zvonika (zvonica)</p> 	<p>Opis poškodb: razpoke v lokih; zasuk ali zdrs stebrov</p> <p>Faktor pomembnosti: $\rho = 1.0$</p> <p>Indikatorji ranljivosti:</p> <ul style="list-style-type: none"> • čokati stebri in/ali loki z majhnimi odprtinami • natezne ali obodne vezi • sile iz strešne konstrukcije <p>Protipotresni indikatorji:</p> <ul style="list-style-type: none"> • dobra, homogena kvaliteta zidovja (brez faznosti gradnje) • vezi v različnih višinah

4.7.2 Analiza in rezultati

Za obravnavane objekte smo izračunali indekse ranljivosti i_v skladno z enačbo (59) ter pripadajočimi navodili oziroma opisi (preglednici 16 in 17). Pri tem smo vrednosti indikatorjev določili na osnovi fotodokumentacije in katastrof poškodb iz baze podatkov, nekatere objekte pa smo preverili tudi na terenu. Izračunani indeksi ranljivosti so prikazani v preglednici 18.

Vrednosti indeksa i_v znašajo od 0.480 do 0.644. Najmanj so ranljivi sledeči objekti: Visoko pod Kureščkom - Cerkev sv. Nikolaja ($i_v = 0.480$), Koper - Krstilnica sv. Janeza Krstnika ($i_v = 0.481$) in Laško - Cerkev sv. Martina ($i_v = 0.481$). Najbolj pa so ranljivi objekti: Čezsoča - Cerkev sv. Antona Puščavnika ($i_v = 0.644$), Tolmin - Cerkev sv. Urha ($i_v = 0.600$) in Murska Sobota - Cerkev sv. Nikolaja ($i_v = 0.598$).

Ob upoštevanju enačbe (60) v enačbi (57) smo, enako kot pri prejšnji metodi, izračunali mejni pospešek a_{MSN} , ki povzroči predpostavljeno mejno poškodovanost $\mu_{D,MSN} = 3.5$:

$$a_{MSN} = 0.025 \cdot 1.8^{5.18 - 3.44 \cdot i_v} \quad (61)$$

Mejne pospeške a_{MSN} lahko primerjamo z zahtevami potresa – projektnim pospeškom a_d v smislu indeksa potresne ogroženosti, kot pri metodi na 1. nivoju z enačbo (58). Izračunani mejni pospeški a_{MSN} se za obravnavane objekte gibljejo od 0.14 do 0.20 g in so v povprečju nižji kot pri metodi na 1. nivoju (slika 49). Analiza indeksov potresne ogroženosti pokaže, da je potresno ogroženih 67 % obravnavanih objektov.

Komentar

Če si podrobneje ogledamo formulo za izračun indeksa ranljivosti (59), lahko ugotovimo, da je izračun indeksa zastavljen tako, da izhodiščna vrednost indeksa znaša 0.5, razlika med vrednostmi indikatorjev ranljivosti in protipotresnimi indikatorji pa vpliva na povečanje ali zmanjšanje indeksa. Če bi vsakem mehanizmu pripisali enako vrednost indikatorja ranljivosti in protipotresnega indikatorja, bi vrednost indeksa ranljivosti znašala 0.5. Če določen mehanizem ne bi imel protipotresnega indikatorja, ki bi uravnotežil indikator ranljivosti, se vrednost indeksa ranljivosti poveča – objekt je bolj potresno ranljiv. V nasprotnem primeru, ko imajo protipotresni indikatorji večjo težo kot potresni indikatorji, je razlika med obema indikatorjema negativna, kar zmanjšuje indeks ranljivosti. Da je razlika indikatorjev lahko negativna izhaja iz definicije indeksa ranljivosti, ki zavzema vrednosti med 0 in 1. To nas privede do razmišljanja, da je nek mehanizem ustrezno, oziroma maksimalno preprečen, ko je razlika med obema indikatorjema enaka -3 .

Drug razmislek zadeva relativnostni vidik indeksa. Po definiciji indeks izraža povprečno ranljivost vseh možnih mehanizmov, česar se je potrebno zavedati pri interpretaciji rezultatov. Tako ima na primer nek mehanizem z enakimi vrednostmi obeh indikatorjev pri neki enostavni manjši cerkvi z majhnim številom možnih mehanizmov, večji vpliv na končni indeks ranljivosti kot pri drugi, kompleksnejši cerkvi z velikim številom možnih mehanizmov. To je razumljivo: pri potresu, ki bi aktiviral mehanizem, bi bile poškodbe pri prvi, enostavni cerkvi relativno velike, pri drugi, kompleksnejši, pa relativno majhne v smislu obsega poškodovanosti celotnega objekta, pa čeprav bi šlo za isti obseg poškodb v absolutnem smislu. V tem oziru je potrebno razumeti tudi izračunane mejne pospeške, ki naj bi povzročili predpostavljeno povprečno poškodovanost objekta: prvi, enostavni cerkvi bi ustrezal manjši računski mejni pospešek kot drugi, kompleksnejši cerkvi. Drug nazoren primer je, če primerjamo dve cerkvi z enakim številom možnih mehanizmov, pri čemer so pri prvi cerkvi pri vseh mehanizmih indikatorji ranljivosti in protipotresni indikatorji uravnoteženi ($v_{ki} = v_{kp}$), pri drugi cerkvi pa razlika indikatorjev enega mehanizma maksimalna ($v_{ki} - v_{kp} = 3$), drugega mehanizma minimalna ($v_{ki} - v_{kp} = -3$), ostali mehanizmi pa so uravnoteženi. Indeks ranljivosti in pripadajoči mejni pospešek je pri obeh cerkvah enak, vendar pa bi bile poškodbe pri potresu z mejnim pospeškom bistveno drugačne: pri prvi cerkvi bi bile enakomerno porazdeljene po objektu, pri drugem pa bi bile pri enem makroelementu poškodbe zelo velike, drugi makroelement bi ostal nepoškodovan, pri ostalih makroelementih pa bi bile poškodbe enakomerno razporejene kot pri prvi cerkvi. Navedene problematike se zavedajo tudi avtorji metode in predlagajo, da se poleg skupnega indeksa ranljivosti ločeno preveri še tiste mehanizme, ki izkazujejo veliko ranljivost.

Nadaljnji problem metode pa je njena subjektivnost. Določanje prisotnosti indikatorjev ranljivosti in protipotresnih indikatorjev je sicer razmeroma razumljivo opredeljena, ocena učinkovitosti posameznih indikatorjev, ki lahko znatno vplivajo na končni rezultat, pa je prepuščena subjektivni

presoji ocenjevalca. Smatramo, da bi bilo subjektivnost ocenjevanja mogoče omiliti z ustreznim usposabljanjem ocenjevalcev.

Preglednica 18: Račun indeksov za cerkve po metodi RISK-UE, 2. nivo

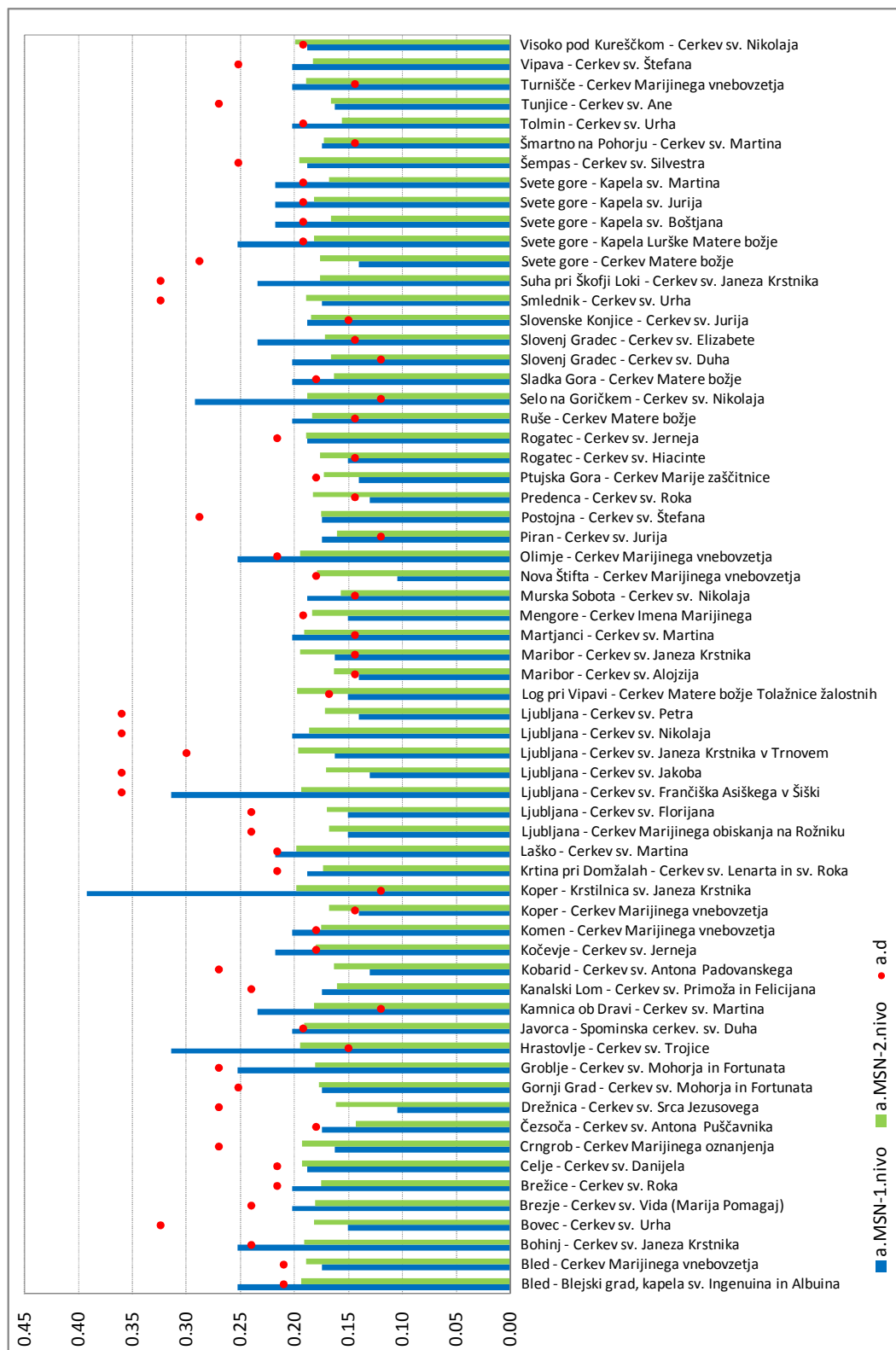
Table 18: Calculation of indexes for churches according to 2nd level of RISK-UE methodology

Št.	Ime enote	i_v	i_d	a_d [g]	a_{MSN} [g]	$I_{R-RISK.2}$
1	Bled - Blejski grad, kapela sv. Ingenuina in Albuina	0.493	0.03	0.21	0.19	1.08
2	Bled - Cerkev Marijinega vnebovzetja	0.506	0.04	0.21	0.19	1.11
3	Bohinj - Cerkev sv. Janeza Krstnika	0.500	0.10	0.24	0.19	1.26
4	Bovec - Cerkev sv. Urha	0.525	0.41	0.32	0.18	1.78
5	Brezje - Cerkev sv. Vida (Marija Pomagaj)	0.526	0.05	0.24	0.18	1.33
6	Brežice - Cerkev sv. Roka	0.543	-	0.22	0.18	1.23
7	Celje - Cerkev sv. Danijela	0.495	0.10	0.22	0.19	1.12
8	Crngrob - Cerkev Marijinega oznanjenja	0.495	-	0.27	0.19	1.40
9	Čezsoča - Cerkev sv. Antona Puščavnika	0.644	0.41	0.18	0.14	1.26
10	Drežnica - Cerkev sv. Srca Jezusovega	0.583	0.22	0.27	0.16	1.67
11	Gornji Grad - Cerkev sv. Mohorja in Fortunata	0.536	0.07	0.25	0.18	1.42
12	Groblje - Cerkev sv. Mohorja in Fortunata	0.528	0.07	0.27	0.18	1.49
13	Hrastovlje - Cerkev sv. Trojice	0.490	0.03	0.15	0.20	0.77
14	Javorca - Spominska cerkev. sv. Duha	0.500	0.05	0.19	0.19	1.00
15	Kamnica ob Dravi - Cerkev sv. Martina	0.524	0.08	0.12	0.18	0.66
16	Kanalski Lom - Cerkev sv. Primoža in Felicijana	0.586	0.27	0.24	0.16	1.50
17	Kobarid - Cerkev sv. Antona Padovanskega	0.576	0.25	0.27	0.16	1.65
18	Kočevje - Cerkev sv. Jerneja	0.529	0.05	0.18	0.18	1.00
19	Komen - Cerkev Marijinega vnebovzetja	0.543	-	0.18	0.18	1.03
20	Koper - Cerkev Marijinega vnebovzetja	0.563	0.05	0.14	0.17	0.86
21	Koper - Krstilnica sv. Janeza Krstnika	0.481	0.04	0.12	0.20	0.60
22	Krtina pri Domžalah - Cerkev sv. Lenarta in sv. Roka	0.547	0.09	0.22	0.17	1.24
23	Laško - Cerkev sv. Martina	0.481	0.03	0.22	0.20	1.09
24	Ljubljana - Cerkev Marijinega obiskanja na Rožniku	0.564	0.14	0.24	0.17	1.43
25	Ljubljana - Cerkev sv. Florijana	0.557	0.14	0.24	0.17	1.41
26	Ljubljana - Cerkev sv. Frančiška Asiškega v Šiški	0.492	0.04	0.36	0.19	1.85
27	Ljubljana - Cerkev sv. Jakoba	0.556	0.25	0.36	0.17	2.11
28	Ljubljana - Cerkev sv. Janeza Krstnika v Trnovem	0.486	0.01	0.30	0.20	1.53
29	Ljubljana - Cerkev sv. Nikolaja	0.513	0.14	0.36	0.19	1.93
30	Ljubljana - Cerkev sv. Petra	0.553	0.25	0.36	0.17	2.10
31	Log pri Vipavi - Cerkev Matere božje Tolažnice žalostnih	0.483	0.27	0.17	0.20	0.85
32	Maribor - Cerkev sv. Alojzija	0.578	0.18	0.14	0.16	0.88
33	Maribor - Cerkev sv. Janeza Krstnika	0.490	0.15	0.14	0.19	0.74
34	Martjanci - Cerkev sv. Martina	0.500	0.07	0.14	0.19	0.75
35	Mengore - Cerkev Imena Marijinega	0.519	0.13	0.19	0.18	1.04
36	Murska Sobota - Cerkev sv. Nikolaja	0.598	0.13	0.14	0.16	0.92
37	Nova Štifta - Cerkev Marijinega vnebovzetja	0.531	0.21	0.18	0.18	1.00
38	Olimje - Cerkev Marijinega vnebovzetja	0.491	0.00	0.22	0.19	1.11
39	Piran - Cerkev sv. Jurija	0.587	0.06	0.12	0.16	0.75
40	Postojna - Cerkev sv. Štefana	0.543	0.25	0.29	0.18	1.64
41	Predenca - Cerkev sv. Roka	0.522	0.26	0.14	0.18	0.79
42	Ptujska Gora - Cerkev Marije zaščitnice	0.551	0.04	0.18	0.17	1.04
43	Rogatec - Cerkev sv. Hiacinte	0.539	0.12	0.14	0.18	0.82
44	Rogatec - Cerkev sv. Jerneja	0.506	0.09	0.22	0.19	1.14
45	Ruše - Cerkev Matere božje	0.520	0.23	0.14	0.18	0.78
46	Selo na Goričkem - Cerkev sv. Nikolaja	0.508	0.15	0.12	0.19	0.64
47	Sladka Gora - Cerkev Matere božje	0.576	0.16	0.18	0.16	1.10

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 18

Št.	Ime enote	i_v	i_d	a_d [g]	a_{MSN} [g]	$I_{R-RISK.2}$
48	Slovenj Gradec - Cerkev sv. Duha	0.568	0.15	0.12	0.17	0.72
49	Slovenj Gradec - Cerkev sv. Elizabete	0.554	0.06	0.14	0.17	0.84
50	Slovenske Konjice - Cerkev sv. Jurija	0.517	0.12	0.15	0.18	0.81
51	Smlednik - Cerkev sv. Urha	0.505	0.16	0.32	0.19	1.71
52	Suha pri Škofji Loki - Cerkev sv. Janeza Krstnika	0.540	-	0.32	0.18	1.84
53	Svete gore - Cerkev Matere božje	0.540	0.19	0.29	0.18	1.64
54	Svete gore - Kapela Lurške Matere božje	0.524	0.17	0.19	0.18	1.05
55	Svete gore - Kapela sv. Boštjana	0.568	0.15	0.19	0.17	1.15
56	Svete gore - Kapela sv. Jurija	0.524	0.17	0.19	0.18	1.05
57	Svete gore - Kapela sv. Martina	0.563	0.18	0.19	0.17	1.14
58	Šempas - Cerkev sv. Silvestra	0.489	-	0.25	0.20	1.29
59	Šmartno na Pohorju - Cerkev sv. Martina	0.551	0.03	0.14	0.17	0.84
60	Tolmin - Cerkev sv. Urha	0.600	0.19	0.19	0.16	1.23
61	Tunjice - Cerkev sv. Ane	0.568	0.20	0.27	0.17	1.62
62	Turnišče - Cerkev Marijinega vnebovzetja	0.506	0.17	0.14	0.19	0.76
63	Vipava - Cerkev sv. Štefana	0.522	0.19	0.25	0.18	1.38
64	Visoko pod Kureščkom - Cerkev sv. Nikolaja	0.480	0.22	0.19	0.20	0.97



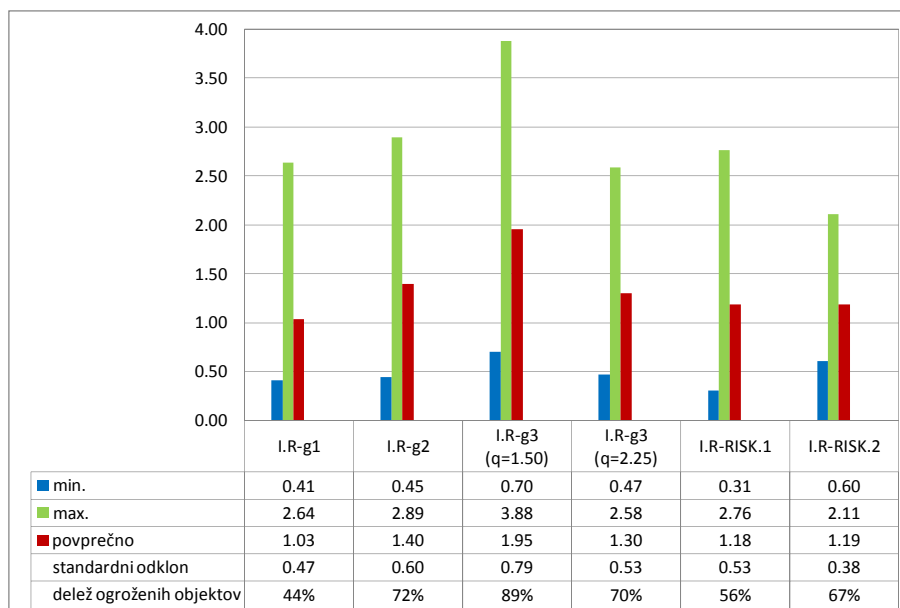
Slika 49: Mejni in projektni pospeški za cerkve, RISK-UE, 1. in 2. nivo

Figure 49: Ultimate and design accelerations for churches, RISK-UE, 1st and 2nd level

4.8 Primerjava metod za ocenjevanje potresne ogroženosti

4.8.1 Primerjava rezultatov obravnavanih metod

Vseh indeksov ne moremo neposredno primerjati med seboj, lahko pa jih primerjamo v smislu indeksov potresne ogroženosti. Na sliki 50 je za vsako metodo prikazana minimalna, maksimalna in povprečna vrednost indeksov potresne ogroženosti vseh obravnavanih objektov ter pripadajoč delež potresno ogroženih objektov. Pri indeksih γ_1 , γ_2 in γ_3 kot merodajno upoštevamo minimalno izmed vrednosti za x in y smer. Vidimo, da je razpon indeksov (razmerje med maksimalno in minimalno vrednostjo) največji pri metodi RISK-UE na 1. nivoju, najmanjši razpon pa pri metodi RISK-UE na 2. nivoju. Najnižje povprečne vrednosti indeksov dobimo pri metodi z indeksom γ_3 ($q = 1.5$). Pri tej metodi je delež potresno ogroženih objektov največji (89 %). Glede na vrednosti ostalih indeksov sklepamo, da je kriterij potresne varnosti, ki izhaja iz indeksa γ_3 nekoliko prestrog. Vzrok za nizke vrednosti indeksov γ_3 je najverjetneje minimalna redukcija potresnih sil s faktorjem obnašanja $q = 1.5$, ki smo jo predpostavili pri računu seizmičnega koeficienta β (14), skladno s standardom EC8. Standard Evrokod v delu EC8-3 sicer navaja, da kulturnozgodovinski objekti lahko zahtevajo posebno obravnavo, ne podaja pa nikakršnih nadaljnjih napotkov. Če se opremo na italijanske smernice za obravnavo kulturnozgodovinskih objektov na seizmičnih območjih (Calvi, Cecchi, 2007), vidimo, da te za obravnavo kulturnozgodovinskih objektov predlagajo precej višje vrednosti faktorja obnašanja: za regularne kulturnozgodovinske objekte $q = 3.0$, za neregularne pa $q = 2.25$. Če za cerkve, kot neregularne objekte, privzamemo vrednost $q = 2.25$, so vrednosti indeksov potresne varnosti za indeks γ_3 mnogo bolj primerljive z indeksi ostalih metod (slika 50, preglednica 19).



Slika 50: Analiza indeksov potresne ogroženosti I_R za vse obravnavane metode

Figure 50: Analysis of seismic risk indexes I_R for all applied methods

Preglednica 19: Primerjava indeksov potresne ogroženosti I_R za vse obravnavane metode

Table 19: Comparison of seismic risk indexes I_R for all applied methods

Št.	Ime enote	$I_{R-\gamma 1}$	$I_{R-\gamma 2}$	$I_{R-\gamma 3}$ (q=1.50)	$I_{R-\gamma 3}$ (q=2.25)	$I_{R-RISK.1}$	$I_{R-RISK.2}$
1	Bled - Blejski grad, kapela sv. Ingenuina in Albuina	0.53	1.03	1.61	1.07	0.83	1.08
2	Bled - Cerkev Marijinega vnebovzetja	0.90	1.38	1.95	1.30	1.20	1.11
3	Bohinj - Cerkev sv. Janeza Krstnika	1.29	0.88	1.70	1.13	0.95	1.26
4	Bovec - Cerkev sv. Urha	1.67	2.13	3.30	2.20	2.15	1.78
5	Brezje - Cerkev sv. Vida (Marija Pomagaj)	0.97	1.80	2.37	1.58	1.19	1.33
6	Brežice - Cerkev sv. Roka	0.72	1.08	1.66	1.11	1.07	1.23
7	Celje - Cerkev sv. Danijela	0.99	1.68	2.24	1.49	1.15	1.12
8	Crngrob - Cerkev Marijinega oznanjenja	2.64	1.97	2.85	1.90	1.66	1.40
9	Čezsoča - Cerkev sv. Antona Puščavnika	1.05	1.05	1.62	1.08	1.03	1.26
10	Drežnica - Cerkev sv. Srca Jezusovega	1.94	2.30	3.10	2.07	2.59	1.67
11	Gornji Grad - Cerkev sv. Mohorja in Fortunata	0.78	1.91	2.48	1.65	1.44	1.42
12	Groblje - Cerkev sv. Mohorja in Fortunata	1.23	1.00	1.81	1.21	1.07	1.49
13	Hrastovlje - Cerkev sv. Trojice	0.72	0.63	0.92	0.61	0.48	0.77
14	Javorca - Spominska cerkev. sv. Duha	1.50	0.45	1.01	0.67	0.95	1.00
15	Kamnica ob Dravi - Cerkev sv. Martina	0.46	0.73	0.97	0.64	0.51	0.66
16	Kanalski Lom - Cerkev sv. Primoža in Felicijana	1.67	1.31	2.40	1.60	1.37	1.50
17	Kobarid - Cerkev sv. Antona Padovanskega	1.41	2.00	3.03	2.02	2.07	1.65
18	Kočevje - Cerkev sv. Jerneja	1.13	1.90	1.78	1.19	0.83	1.00
19	Komen - Cerkev Marijinega vnebovzetja	1.24	1.70	2.24	1.50	0.89	1.03
20	Koper - Cerkev Marijinega vnebovzetja	1.19	1.67	1.84	1.22	1.03	0.86
21	Koper - Krstilnica sv. Janeza Krstnika	0.52	0.84	0.84	0.56	0.31	0.60
22	Krtina pri Domžalah - Cerkev sv. Lenarta in sv. Roka	1.34	1.29	1.93	1.28	1.15	1.24
23	Laško - Cerkev sv. Martina	0.93	1.25	1.76	1.17	0.99	1.09
24	Ljubljana - Cerkev Marijinega obiskanja na Rožniku	0.85	1.42	2.16	1.44	1.59	1.43

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 19

Št.	Ime enote	$I_{R-\gamma_1}$	$I_{R-\gamma_2}$	$I_{R-\gamma_3}$ ($q=1.50$)	$I_{R-\gamma_3}$ ($q=2.25$)	$I_{R-RISK.1}$	$I_{R-RISK.2}$
25	Ljubljana - Cerkev sv. Florijana	0.78	1.66	2.22	1.48	1.59	1.41
26	Ljubljana - Cerkev sv. Frančiška Asiškega v Šiški	2.49	1.57	1.83	1.22	1.16	1.85
27	Ljubljana - Cerkev sv. Jakoba	1.10	2.89	3.88	2.58	2.76	2.11
28	Ljubljana - Cerkev sv. Janeza Krstnika v Trnovem	1.02	2.34	3.09	2.06	1.85	1.53
29	Ljubljana - Cerkev sv. Nikolaja	1.26	2.58	3.56	2.37	1.78	1.93
30	Ljubljana - Cerkev sv. Petra	1.52	2.21	3.23	2.15	2.57	2.10
31	Log pri Vipavi - Cerkev Matere božje Tolažnice žalostnih	0.71	1.30	1.61	1.07	1.11	0.85
32	Maribor - Cerkev sv. Alojzija	0.84	1.39	1.66	1.11	1.03	0.88
33	Maribor - Cerkev sv. Janeza Krstnika	0.65	1.06	1.30	0.87	0.89	0.74
34	Martjanci - Cerkev sv. Martina	0.55	0.71	1.10	0.73	0.71	0.75
35	Mengore - Cerkev Imena Marijinega	1.60	1.20	2.09	1.39	1.27	1.04
36	Murska Sobota - Cerkev sv. Nikolaja	1.42	1.04	0.98	0.66	0.77	0.92
37	Nova Štifta - Cerkev Marijinega vnebovzetja	0.49	1.45	1.73	1.16	1.72	1.00
38	Olimje - Cerkev Marijinega vnebovzetja	0.67	1.31	1.81	1.21	0.86	1.11
39	Piran - Cerkev sv. Jurija	2.08	1.85	2.21	1.47	0.69	0.75
40	Postojna - Cerkev sv. Štefana	1.02	2.32	3.16	2.10	1.65	1.64
41	Predenca - Cerkev sv. Roka	0.78	1.31	1.69	1.12	1.11	0.79
42	Ptujska Gora - Cerkev Marije zaščitnice	1.01	1.94	2.24	1.49	1.28	1.04
43	Rogatec - Cerkev sv. Hiacinte	0.91	1.16	1.52	1.01	0.95	0.82
44	Rogatec - Cerkev sv. Jerneja	1.01	1.96	2.58	1.72	1.15	1.14
45	Ruše - Cerkev Matere božje	0.67	0.86	1.14	0.76	0.71	0.78
46	Selo na Goričkem - Cerkev sv. Nikolaja	0.41	0.50	0.70	0.47	0.41	0.64
47	Sladka Gora - Cerkev Matere božje	0.77	1.13	1.56	1.04	0.89	1.10
48	Slovenj Gradec - Cerkev sv. Duha	0.48	0.66	0.91	0.60	0.59	0.72
49	Slovenj Gradec - Cerkev sv. Elizabete	0.68	0.91	1.24	0.82	0.61	0.84
50	Slovenske Konjice - Cerkev sv. Jurija	0.65	0.89	1.21	0.81	0.80	0.81
51	Smladnik - Cerkev sv. Urha	1.29	2.30	3.17	2.11	1.85	1.71
52	Suha pri Škofji Loki - Cerkev sv. Janeza Krstnika	0.91	1.54	2.62	1.75	1.38	1.84
53	Svete gore - Cerkev Matere božje	1.90	2.27	3.44	2.30	2.06	1.64
54	Svete gore - Kapela Lurške Matere božje	0.70	0.66	1.24	0.83	0.76	1.05
55	Svete gore - Kapela sv. Boštjana	0.76	0.64	1.11	0.74	0.88	1.15
56	Svete gore - Kapela sv. Jurija	0.52	0.46	0.95	0.63	0.88	1.05
57	Svete gore - Kapela sv. Martina	0.67	0.68	1.23	0.82	0.88	1.14
58	Šempas - Cerkev sv. Silvestra	0.71	2.06	2.55	1.70	1.34	1.29
59	Šmartno na Pohorju - Cerkev sv. Martina	0.65	0.65	1.01	0.67	0.82	0.84
60	Tolmin - Cerkev sv. Urha	1.31	1.07	1.84	1.23	0.95	1.23
61	Tunjice - Cerkev sv. Ane	0.78	1.77	2.42	1.61	1.66	1.62
62	Turnišče - Cerkev Marijinega vnebovzetja	0.85	0.97	1.45	0.96	0.71	0.76
63	Vipava - Cerkev sv. Štefana	1.02	2.09	2.96	1.97	1.25	1.38
64	Visoko pod Kureščkom - Cerkev sv. Nikolaja	0.83	0.66	1.26	0.84	1.02	0.97

V nadaljevanju med seboj primerjamo indekse potresne ranljivosti izračunane z obravnavanimi metodami. Neposredna primerjava indeksov vseh obravnavanih metod ni možna, je pa med seboj možno primerjati indekse tistih metod, kjer je merilo ranljivost lahko izraziti z isto mersko enoto. Možno je primerjati indekse metod RISK-UE na 1. in 2. nivoju ter indekse γ_3 , kjer se za skupno merilo ranljivosti ponuja mejni pospešek a_{MSN} , ki povzroča mejne poškodbe. Ne bomo primerjali indeksov ranljivosti, temveč mejne pospeške, ki jih lahko označimo za indikatorje potresne odpornosti in so obratno sorazmerni z ranljivostjo. Pri makroseizmičnih modelih je potrebno paziti, da je pri obeh

modelih izbrana enaka mejna poškodovanost (upoštevamo $\mu_{D.MSN} = 3.5$), pri indeksu γ_3 , ki je po svoji naravi dejansko že indeks potresne varnosti, pa je potrebno izključiti del, ki izraža seizmičnost. Indeks γ_3 izraža razmerje med horizontalno nosilnostjo in horizontalno obremenitvijo, ki se lahko zapiše tudi kot razmerje med koeficientom strižne nosilnosti ($SRC = \gamma_3^*$) in koeficientom strižne sile ob vpetju ($BSC = \beta$). Iz tega sledi, da γ_3^* izraža normirani mejni pospešek, ki ga konstrukcija lahko prenese, ne da bi bila ogrožena nosilnost (predpostavljamo, da takšno stanje konstrukcije ustreza povprečni stopnji poškodovanosti $\mu_{D.MSN} = 3.5$). Ker pa se del indeksa, ki izraža seizmičnost, nanaša na spektralni pospešek in ne na pospešek temeljnih tal kot pri makroseizmičnih modelih, pri določitvi mejnega pospeška upoštevamo tudi del parametra seizmičnosti, ki izhaja iz potresnega spektra. Za mejni pospešek pri indeksu γ_3 tako upoštevamo:

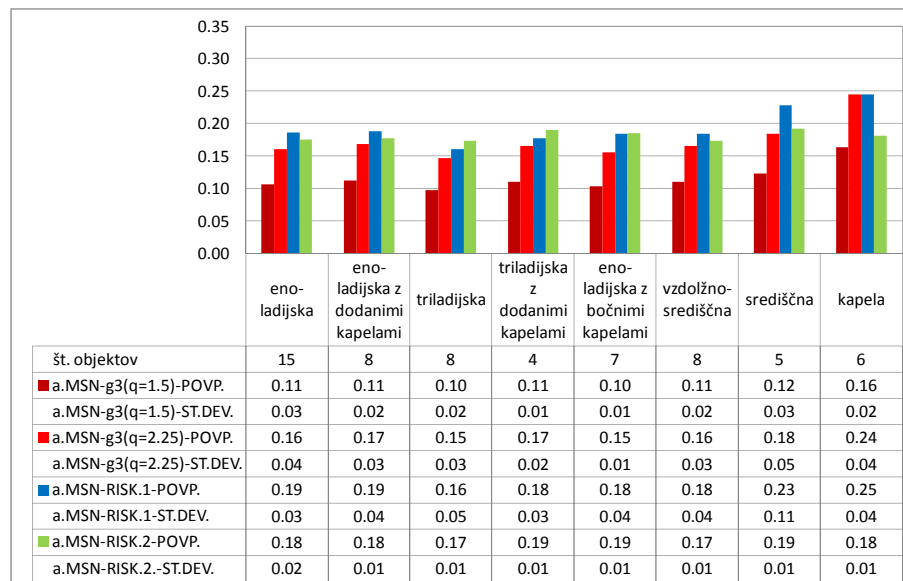
$$a_{MSN-\gamma_3} = \gamma_3^* \cdot \frac{q}{2.5} = \frac{V_{Rd}}{W} \cdot \frac{q}{2.5}. \quad (62)$$

Mejni pospeški treh metod so za vse obravnavane objekte prikazani na sliki 53. Tudi tu je očitno, da so vrednosti za indekse γ_3 ob upoštevanju faktorja obnašanja $q = 1.5$, mnogo nižje kot pri ostalih metodah. Ob upoštevanju faktorja obnašanja $q = 2.25$ so vrednosti bolj primerljive z vrednostmi obeh makroseizmičnih metod (slika 54).

Na sliki 51 prikazujemo povprečne vrednosti mejnih pospeškov – indeksov potresne odpornosti za posamezne tipe tlorisne zasnove. Ob upoštevanju faktorja obnašanja $q = 2.25$ so vrednosti za indeks γ_3 primerljive z vrednostmi obeh makroseizmičnih metod. Nadalje lahko ugotovimo, da se povprečne vrednosti indeksov med posameznimi tlorisnimi tipi v splošnem malo razlikujejo. Najmanj je na raznolikost tlorisne zasnove občutljiva metoda RISK-UE na 2. nivoju, najbolj pa metoda RISK-UE na 1. nivoju. Razlike so še najbolj izrazite pri kapelah, kjer metoda z indeksom γ_3 in metoda RISK-UE na 1. nivoju kažeta izrazito višje vrednosti kot pri ostalih tlorisnih zasnovah. Pri metodi z indeksom γ_3 je to razumljivo, saj imajo kapele praviloma visok delež zidov glede na tlorisno površino, pri metodi RISK-UE na 1. nivoju pa je za kapele izhodiščni indeks ranljivosti že v osnovi manjši (preglednica 14). Metoda RISK-UE na 2. nivoju ne zazna posebnosti kapel, razen če tega ne predvidi ocenjevalec z ustrezno visokim točkovanjem protipotresnih indikatorjev. Pri vseh metodah najnižje povprečne vrednosti indeksov potresne odpornosti dosegajo objekti s triladijsko zasnovo, kar nakazuje, da so ti objekti najbolj potresno ranljivi.

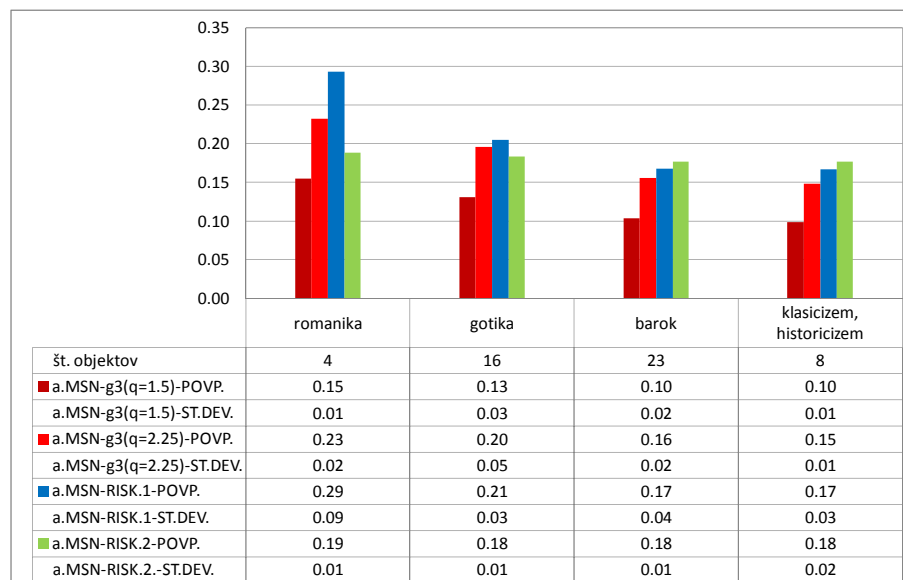
Na sliki 52 prikazujemo tudi povprečne vrednosti indeksov potresne odpornosti za posamezne umetnostne sloge. Glede na rezultate bi sicer lahko sklepali, da so objekti novejših umetnostnih slogov bolj potresno ranljivi, vendar pa so rezultati, kot smo ugotavljali že pri analizi indeksov γ_1 , γ_2 in γ_3 v predhodnih poglavjih, nezanesljivi zaradi omejenega nabora objektov in raznolikosti tlorisnih zasnov.

Za bolj zanesljive zaključke bi morali med seboj primerjati le objekte znotraj primerljivih tlorisnih tipov, za kar pa bi potrebovali večji nabor objektov.



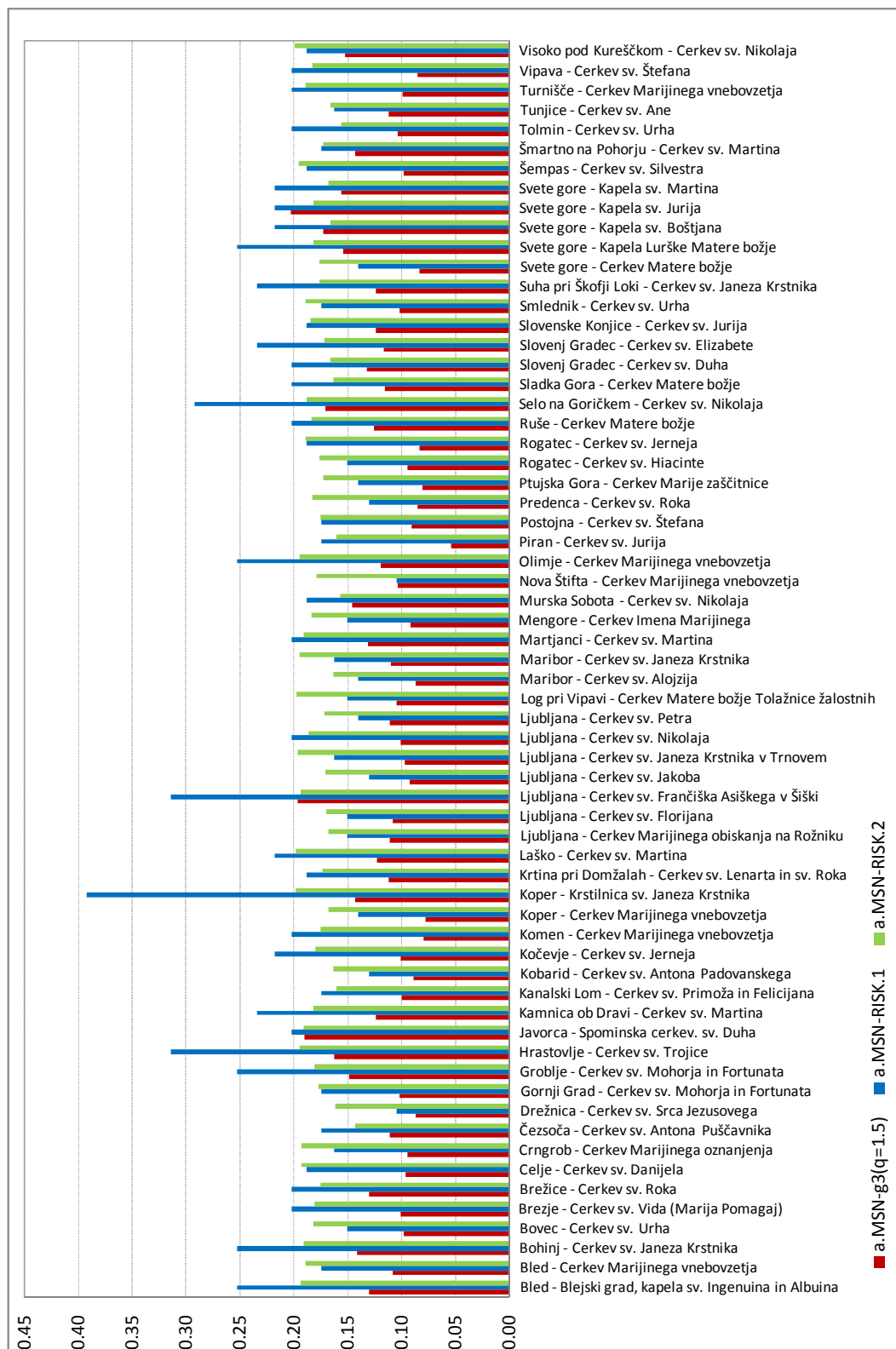
Slika 51: Povprečni mejni pospeški a_{MSN} (kot indeksi potresne odpornosti) za različne tipe tlorisne zasnove

Figure 51: Average ultimate accelerations a_{MSN} (as seismic resistance indexes) for different floor plan types



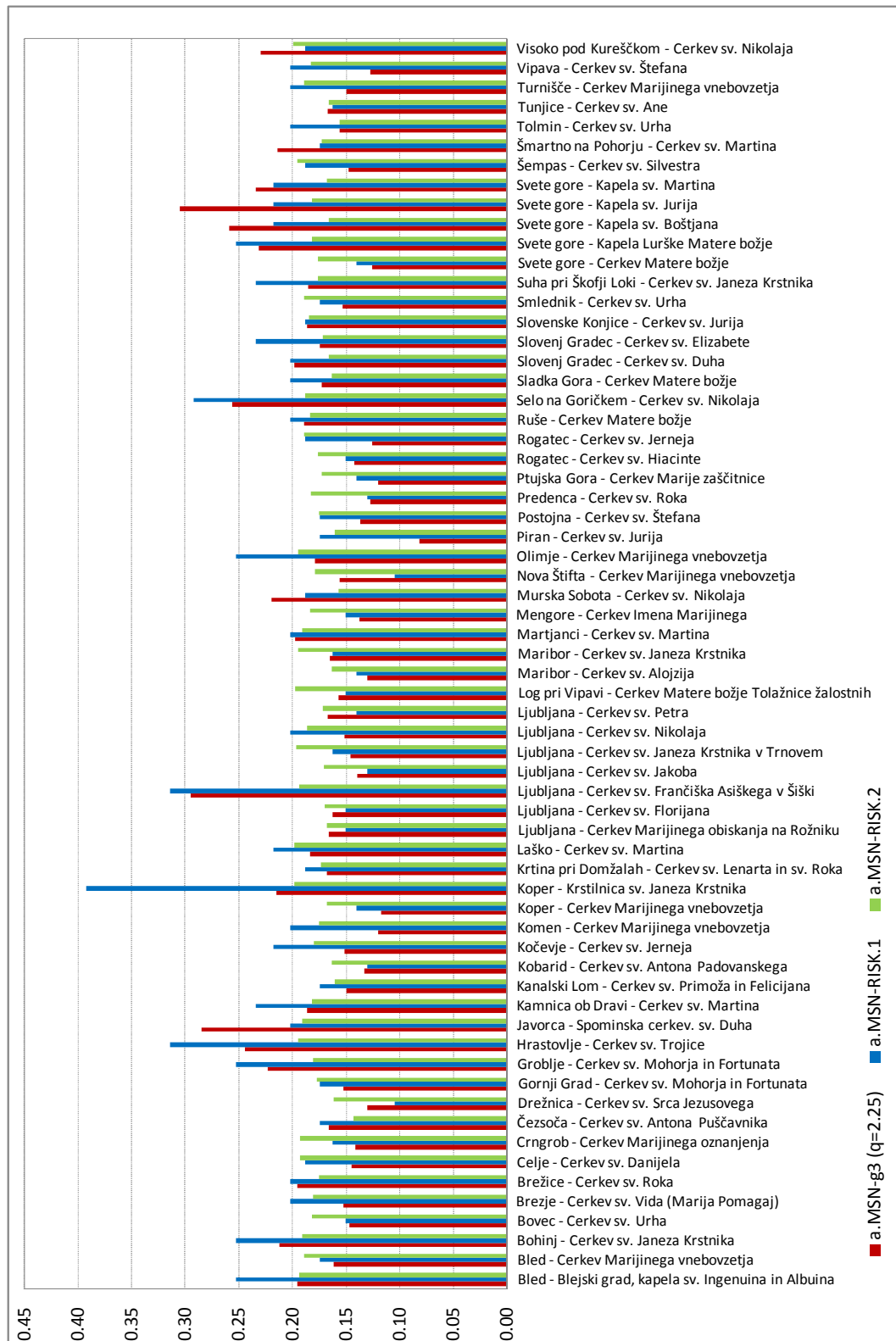
Slika 52: Povprečni mejni pospeški a_{MSN} (kot indeksi potresne odpornosti) za različne umetnostne sloge

Figure 52: Average ultimate accelerations a_{MSN} (as seismic resistance indexes) for different architectural styles



Slika 53: Mejni pospeški a_{MSN} (kot indeksi potresne odpornosti) za metode: $\gamma_3(q = 1.5)$, RISK-UE 1. nivo in RISK-UE 2. nivo

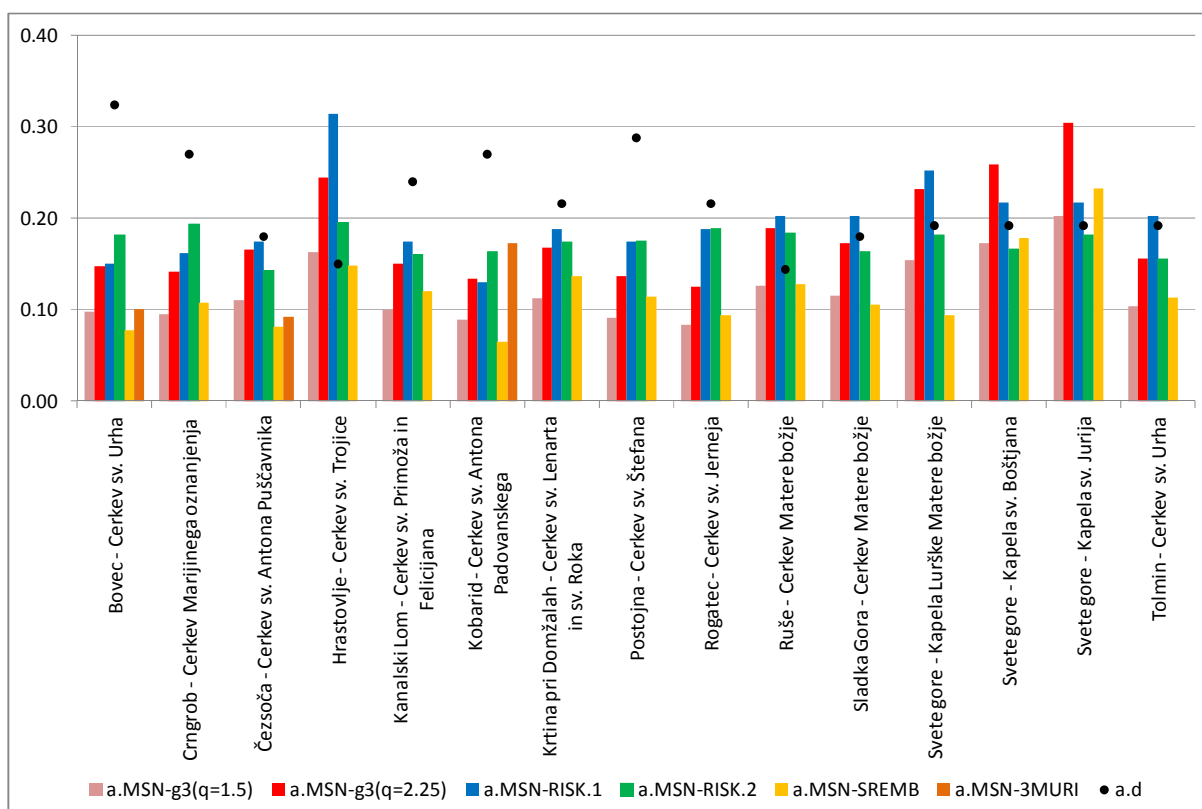
Figure 53: Ultimate accelerations a_{MSN} (as seismic resistance indexes) for the following methods: $\gamma_3(q = 1.5)$, RISK-UE, 1st and 2nd level



Slika 54: Mejni pospeški a_{MSN} (kot indeksi potresne odpornosti) za metode: $\gamma_3(q = 2.25)$, RISK-UE 1. nivo in RISK-UE 2. nivo

Figure 54: Ultimate accelerations a_{MSN} (as seismic resistance indexes) for the following methods: $\gamma_3(q = 2.25)$, RISK-UE, 1st and 2nd level

Mejne pospeške izračunane z enostavnimi metodami lahko primerjamo z rezultati natančnejših računskih analiz, ki smo jih izvedli v okviru poglavja 4.5.3.4. S programom SREMB smo izračunali potresno odpornost za 15 karakterističnih objektov, za 3 objekte pa podajamo rezultate analize programa 3MURI povzete po (Naglič, 2011). Pri programu 3MURI mejni pospešek a_{MSN} predstavlja rezultat analize, pri programu SREMB pa mejni pospešek določimo na enak način kot pri metodi z indeksom γ_3 z enačbo (62), le da tu upoštevamo dejanski faktor obnašanja določen iz krivulje potresne odpornosti objekta.



Slika 55: Mejni pospeški a_{MSN} – primerjava z računskimi metodami

Figure 55: Ultimate accelerations a_{MSN} – comparison with numerical methods

Primerjava mejnih pospeškov izračunanih z enostavnimi metodami in s programom SREMB je prikazana na sliki 55. Mejni pospeški izračunani s programom SREMB so še najbolj primerljivi z rezultati metode z indeksom $\gamma_3(q = 1.5)$, saj so ti v povprečju višji le za 5 %. Če pri metodi z indeksom γ_3 upoštevamo faktor obnašanja $q = 2.25$ so mejni pospeški v povprečju višji za 58 % od rezultatov s programom SREMB. Pri metodi RISK-UE na 1. nivoju so mejni pospeški v povprečju višji za 75 %, pri 2. nivoju te metode pa za 59 %. Rezultati analize s programom 3MURI so primerljivi z rezultati programa SREMB, razen pri cerkvi sv. Antona Padovanskega v Kobaridu, kjer je mejni pospešek mnogo višji kot pri programu SREMB ter primerljiv z rezultati metod RISK-UE. Pri tem objektu primerjava koeficientov potresnih odpornosti (SRC) prikazana v poglavju 4.5.3.4 kaže obratno sliko,

saj je potresna odpornost izračunana s programom 3MURI nižja kot s programom SREMB (sliki 35 in 36). Najverjetneje gre vzrok za te razlike iskati v računskem modelu objekta.

Iz navedenega bi lahko sklepali, da je od obravnavanih enostavnih metod najbolj primerna metoda z indeksom $\gamma_3 (q = 1.5)$, saj se rezultati dobro ujemajo z rezultati natančnejših računskih analiz, metode RISK-UE pa so glede ocene potresne odpornosti preveč optimistične. Vendar pa se je pri tem potrebno zavedati omejitev in pomanjkljivosti obravnavanih natančnejših računskih metod. Kot smo ugotovljali že v poglavju 4.5.3.4, program SREMB ni najbolj primeren za obravnavo sakralnih objektov, saj pogoj povezave zidov z diafragmami na nivoju stropnih konstrukcij večinoma ni izpolnjen. Poleg tega program tudi ne upošteva dejanskih izvenravninskih mehanizmov. Primerjavo rezultatov lahko interpretiramo tudi z drugega zornega kota: empirični metodi RISK-UE izražata realno oceno potresne odpornosti, saj sta bili zasnovani na osnovi opazovanja dejanskih poškodb več tisoč sakralnih objektov poškodovanih v potresih, obravnavane računske metode (SREMB) pa so za obravnavo sakralnih objektov preveč konservativne. Možen vzrok za nižje vrednosti potresne odpornosti izračunane s programom SREMB je, da smo upoštevali preveč konservativno ocenjene mehanske karakteristike zidovja tako glede trdnosti kot tudi duktilnosti. Ocenjene karakteristike trdnosti zidovja so reducirane s faktorji zaupanja ($CF = 1.35$), za duktilnost zidov pa smo upoštevali $\mu_{du} = 1.5$, kar je spodnja meja priporočenih vrednosti za nearmirano zidovje. V strokovni literaturi (Tomažević, 1987 in Tomažević, 2009) znašajo priporočene vrednosti faktorja duktilnosti za nearmirano zidovje od 1.5 do 3.0. Večji faktor duktilnosti zidov bi pomenil, da ima konstrukcija večjo sposobnost prevzemanja potresne obtežbe v nelinearnem območju, kar bi pomenilo večji faktor obnašanja konstrukcije q . Tudi primerjava rezultatov metode z indeksom γ_3 in metod RISK-UE kaže, da je ocena potresne odpornosti ob upoštevanju minimalnega faktorja obnašanja ($q = 1.5$) preveč konservativna, ob upoštevanju večjega faktorja obnašanja ($q = 2.25$) pa so rezultati metod bolj primerljivi.

4.8.2 Prednosti in slabosti obravnavanih metod

Preverili smo tri metode za ocenjevanje potresne ogroženosti sakralnih stavb: metodo s poenostavljenimi indeksi za cerkve, metodo RISK-UE na 1. nivoju in metodo RISK-UE na 2. nivoju, pri čemer ima vsaka metoda svoje prednosti in slabosti (preglednica 20).

Prednosti metode s poenostavljenimi indeksi za cerkve (γ_1 , γ_2 in γ_3) so predvsem enostavnost izračuna in objektivnost metode (majhen vpliv subjektivnosti ocenjevanja), glavne slabosti pa so, da je potreben posnetek objekta ter da ne zajemajo pojava izvenravninskih mehanizmov. Izmed treh indeksov je še najbolj primeren indeks γ_3 , ki za razliko od drugih zajema tudi vpliv materialnih karakteristik, ter tako tudi vpliv nekaterih utrditvenih ukrepov (npr. injektiranje zidov), pri čemer pa računsko ni bistveno zahtevnejši od indeksov γ_1 in γ_2 .

Prednost metode RISK-UE na 1. nivoju je predvsem, da je izračun zelo enostaven in hiter. Pri tem zajema veliko število enostavno določljivih parametrov, s čimer zajame posebnosti posameznih sakralnih objektov. Vpliv subjektivnosti ocenjevanja posameznih parametrov je razmeroma majhen. Kot slabost omenimo dejstvo, da gre za empirično metodo, ki je izpeljana za italijanske sakralne objekte, ki se lahko nekoliko razlikujejo od slovenskih.

Pri metodi RISK-UE na 2. nivoju kot glavno prednost izpostavljamo dejstvo, da zajema tudi izvenravninske mehanizme, kot glavno slabost pa predvsem subjektivnost metode. Slednje je sicer mogoče zmanjšati z ustrežno usposobljenostjo ocenjevalcev.

Preglednica 20: Prednosti in slabosti obravnavanih metod

Table 20: Advantages and disadvantages of applied methods

Metoda	Vhodni podatki	Izhodni podatki	Prednosti	Slabosti
Indeks γ_1	površina nosilnih zidov, seizmičnost lokacije	indeks potresne odpornosti, indeks potresne ogroženosti	enostavnost izračuna, zanemarljiv vpliv subjektivnosti ocenjevanja, terenski ogled ni potreben	potreben posnetek objekta, ne upošteva teže objekta, problematična določitev mejnih vrednosti, ni mogoče upoštevati vpliva materialnih karakteristik ali sanacije, ne zajema izvenravninskih mehanizmov
Indeks γ_2	površina nosilnih zidov, teža objekta, seizmičnost lokacije	indeks potresne odpornosti, indeks potresne ogroženosti	zmerna enostavnost izračuna, zanemarljiv vpliv subjektivnosti ocenjevanja, terenski ogled ni potreben	potreben posnetek objekta, problematična določitev mejnih vrednosti, ni mogoče upoštevati vpliva materialnih karakteristik ali sanacije, ne zajema izvenravninskih mehanizmov
Indeks γ_3	površina nosilnih zidov, teža objekta, materialne karakteristike, seizmičnost lokacije, q faktor	indeks potresne odpornosti, indeks potresne ogroženosti	zmerna enostavnost izračuna, zanemarljiv vpliv subjektivnosti ocenjevanja, primerljivost z računskimi metodami, vpliv materialnih karakteristik ali sanacije je mogoče upoštevati, terenski ogled ni potreben	potreben posnetek objekta, ne zajema izvenravninskih mehanizmov
RISK-UE, 1. nivo	osnovni podatki o objektu in lokaciji, seizmičnost lokacije	pričakovana stopnja poškodovanosti, indeks ranljivosti, mejni pospešek, indeks potresne ogroženosti	hiter izračun, veliko enostavno določljivih parametrov, majhen vpliv subjektivnosti ocenjevanja	empirična metoda, potreben terenski ogled,
RISK-UE, 2. nivo	indikatorji ranljivosti, protipotresni indikatorji, seizmičnost lokacije	indeks ranljivosti, mejni pospešek, indeks potresne ogroženosti	obravnavava izvenravninskih mehanizmov, vpliv sanacije je mogoče upoštevati	empirična metoda, potreben terenski ogled, velik vpliv subjektivnosti ocenjevanja, (potrebna je usposobljenost ocenjevalcev)

Na vprašanje, katera izmed obravnavanih metod daje bolj realne rezultate, na podlagi izvedenih analiz ni mogoče dati zanesljivega odgovora. Potrebne bi bile obsežnejše primerjave z dejanskim obnašanjem objektov med potresi ali obsežnejše računske analize. Izvedene računske analize na omejenem naboru objektov s poenostavljeno nelinearno statično analizo s programom SREMB sicer nakazujejo, da so rezultati metod RISK-UE, še zlasti metode na 1. nivoju, morda preveč optimistični, vendar pa po drugi strani tudi rezultati programa SREMB ne kažejo nujno realne slike, kot smo to obrazložili v prejšnjem poglavju. Tudi analiza poškodovanosti cerkva iz zgornjega Posočja, ki so bile poškodovane v potresu l. 2004, glede verodostojnosti indeksov ne daje bolj zanesljivih zaključkov. Glavni problem je, da ne razpolagamo s podatki o velikosti efektivnih vršnih pospeškov. Avtorji s področja seizmologije navajajo, da so ob potresu izmerjeni vršni pospeški na lokacijah Bovca, Drežnice in Kobarida znašali 0.13–0.49 g, kar (z izjemo meritve v Kobaridu) presega vrednosti projektnih pospeškov, ki za to območje znašajo 0.20–0.25 g (Lapajne, 2005). Ne glede na to pa je analiza odziva zidanih stavb na potres pokazala, da jakost potresa ni presegla največje pričakovane (Tomažević et al., 2005, cit. po Lapajne, 2005). Izmerjeni vršni pospeški so bili torej večji od projektnih, česar pa poškodbe na objektih niso izkazovale, saj so bili statistični učinki potresa na objekte ocenjeni z največ VI.–VII. stopnjo po EMS lestvici. Lapajne (2005) ugotavlja, da izmerjenih vrednosti vršnega pospeška ni mogoče preprosto primerjati z vrednostmi projektnega pospeška tal na karti potresne nevarnosti ter da so za takšno primerjavo bolj primerni efektivni vršni pospeški, ki pa jih zaradi številnih neznank zaenkrat ni mogoče določiti. Če se efektivne vršne pospeške oceni iz potresnih intenzitet, bi ti v konkretnem primeru znašali 0.05–0.10 g (Lapajne, 2009). Iz navedenega je očitno, da je podatek o dejanskem pospešku temeljnih tal, s katerim bi lahko primerjali mejne pospeške izračunane v okviru naše analize vprašljiv. Če predpostavimo, da so bile obravnavane cerkve izpostavljene efektivnemu vršnemu pospešku velikosti vsaj 0.10 g, lahko domnevamo, da so vrednosti indeksov γ_3 ob upoštevanju faktorja obnašanja $q = 1.5$ podcenjene, saj bi bili praktično pri vseh obravnavanih cerkvah iz Posočja (izjema je cerkev na Javorci, ki je lesena) izračunani mejni pospeški doseženi ali preseženi, kar bi se moralo izkazati v poškodovanosti cerkva 3. do 4. stopnje, dejansko poškodovanost cerkva pa lahko ocenimo na kvečjemu 2. – 3. stopnjo po EMS-98 lestvici.

Analiza obravnavanih objektov je sicer pokazala, da so rezultati vseh treh metod (indeks γ_3 , RISK-UE, 1. nivo in RISK-UE, 2. nivo) do neke mere med seboj primerljivi (če pri indeksu γ_3 upoštevamo nekoliko večji faktor obnašanja konstrukcije od prvotno predpostavljenega). Najbolj pesimistično oceno potresne ogroženosti daje v splošnem metoda z indeksom γ_3 , najbolj optimistično pa metoda RISK-UE na 1. nivoju. Metoda RISK-UE na 2. nivoju ne zajema posebnosti kapel.

Ker nas bolj kot absolutna natančnost rezultatov v okviru naloge zanimajo relativne vrednosti za potrebe razvrščanja objektov po potresni ogroženosti, so načeloma primerne vse tri obravnavane

metode. Za ocenjevanje potresne ogroženosti zvonikov predlagamo metodo, ki smo jo izpeljali iz indeksa γ_3 za cerkve.

4.9 Ocena potresne ogroženosti sakralnih stavb na teritorialnem nivoju

Na podlagi opravljenih analiz je do neke mere mogoče sklepati tudi na potresno ogroženost sakralnih objektov na širšem, teritorialnem nivoju. Ob predpostavljene povprečni potresni odpornosti sakralnih objektov ter števila sakralnih objektov v posameznih potresnih conah lahko ocenimo število potresno ogroženih objektov v Sloveniji. Pri tem obravnavamo samo kulturnozgodovinske objekte, ki so evidentirani v registru nepremične kulturne dediščine. Pod zvrstjo "stavbe" je evidentiranih 2636 enot sakralne stavbne dediščine (Register nepr. kultur. dediščine, 2012). Poleg cerkva in kapel so tu vključene tudi krstilnice, rotunde, mežnarije, samostani, lokacije (ambient, romarsko središče), ruševine ipd., tako da je skupno število enot primernih za obravnavo nekoliko manjše. S pomočjo spletne aplikacije registra (Register nepr. kultur. dediščine, 2012), ki omogoča tudi iskanje enot po geslih, smo lahko ocenili število sakralnih objektov, ločeno za cerkve in kapele. Kot cerkve smo opredelili 2322 enot, kot kapele (vključene so tudi krstilnice in rotunde) pa 302 enoti, kar skupaj znaša 2624 enot.⁷ Nadalje smo z uporabo spletne aplikacije registra določili število enot za posamezne slovenske občine, ločeno za cerkve in kapele. S pomočjo karte potresne nevarnosti Slovenije (slika 19) smo ocenili potresno nevarnost za posamezne občine, ter na podlagi tega določili število sakralnih objektov znotraj posameznih območjih potresne nevarnosti. Za povprečno potresno odpornost sakralnih objektov a_{MSN} upoštevamo povprečno vrednost potresnih odpornosti objektov analiziranih v predhodnih poglavjih. Pri tem povprečje izračunamo ločeno za kapele (upoštevamo tudi krstilnico) ter ločeno za preostale tlorisne tipe (preglednica 21). Pri določitvi mejnega pospeška a_d poleg projektnega pospeška temeljnih tal upoštevamo faktor obnašanja $\gamma = 1.0$ in faktor temeljnih tal $S = 1.2$. S primerjavo povprečnih potresnih odpornosti in povprečnih mejnih pospeškov izračunamo povprečne indekse potresne ogroženosti in število potresno ogroženih objektov (preglednica 22).

Preglednica 21: Povprečni mejni pospeški a_{MSN}

Table 21: Average ultimate accelerations a_{MSN}

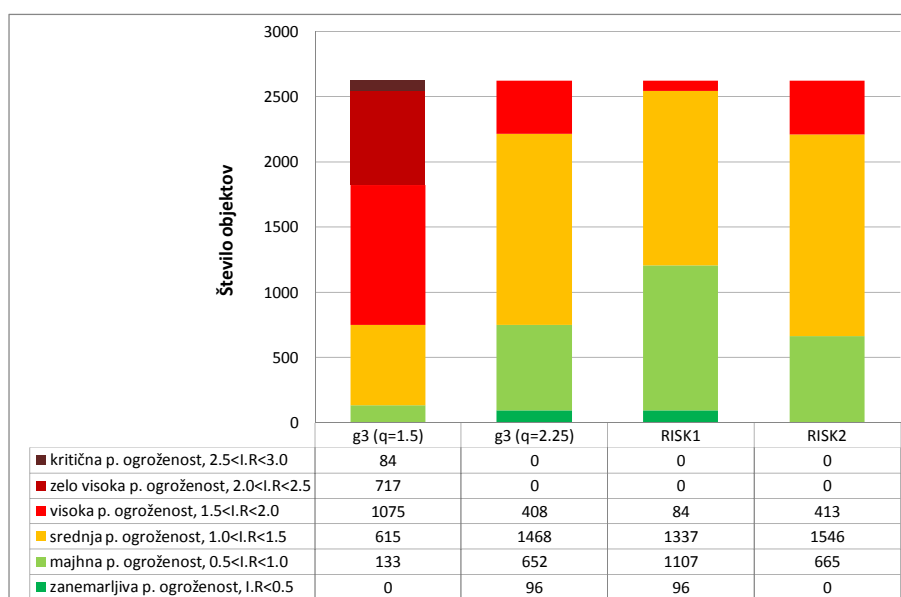
Metoda	Povprečni indeksi potresne odpornosti (kot mejni pospeški) a_{MSN}			
	$\gamma_3(q=1.5)$	$\gamma_3(q=2.25)$	RISK-UE, 1. nivo	RISK-UE, 2. nivo
Cerkve	0.111	0.167	0.185	0.179
Kapele	0.163	0.245	0.245	0.181

⁷ Število enot ni nujno povsem točno, saj ločitev med cerkvijo in kapelo ni strogo definirana. Manjše cerkve so lahko obravnavane kot cerkve ali kapele.

Preglednica 22: Število objektov po območjih potresne nevarnosti in povprečni indeksi potresne ogroženosti I_R Table 22: Number of buildings for different seismic regions and average seismic risk indexes I_R

Potresno območje α_{gR}	Število cerkva	Število kapel	α_d	Povprečni indeks potresne ogroženosti I_R							
				$\gamma_3(q=1.5)$		$\gamma_3(q=2.25)$		RISK-UE, 1. nivo		RISK-UE, 2. nivo	
				Cerkve	Kapele	Cerkve	Kapele	Cerkve	Kapele	Cerkve	Kapele
0.250	84	5	0.3	2.70	1.84	1.80	1.22	1.62	1.22	1.68	1.66
0.225	324	32	0.27	2.43	1.66	1.62	1.10	1.46	1.10	1.51	1.49
0.200	393	33	0.24	2.16	1.47	1.44	0.98	1.30	0.98	1.34	1.33
0.175	583	50	0.21	1.89	1.29	1.26	0.86	1.13	0.86	1.17	1.16
0.150	455	49	0.18	1.62	1.10	1.08	0.73	0.97	0.73	1.01	0.99
0.125	188	37	0.15	1.35	0.92	0.90	0.61	0.81	0.61	0.84	0.83
0.100	295	96	0.12	1.08	0.74	0.72	0.49	0.65	0.49	0.67	0.66
Število potresno ogroženih objektov:				2322 (100 %)	169 (56 %)	1839 (79 %)	37 (12 %)	1384 (60 %)	37 (12 %)	1839 (79 %)	120 (40 %)

Tako izvedena ocena kaže, da je večina slovenskih sakralnih objektov potresno ogrožena, ne glede na izbrano metodo. Pri tem je metoda z indeksom γ_3 ob upoštevanju faktorja obnašanja $q = 1.5$ najverjetneje prestroga, saj bi bilo potresno ogroženih 95 % vseh objektov (vse cerkve in 56 % kapel). Potresna odpornost bi bila pri cerkvah v območjih z najvišjo potresno nevarnostjo prekoračena 2.7-krat. Ob upoštevanju faktorja obnašanja $q = 2.25$ bi bilo po tej metodi potresno ogroženih 1876 (71 %) objektov, kar je primerljivo z metodo RISK-UE, 2. nivo, kjer je potresno ogroženih 1959 (75 %) objektov. Nekoliko bolj optimistične rezultate daje metoda RISK-UE, 1. nivo, kjer je potresno ogroženih 1421 (54 %) objektov.



Slika 56: Ocena potresne ogroženosti sakralnih objektov z različnimi metodami

Figure 56: Seismic risk of sacral buildings estimated with different methods

Če določimo kriterije za stopnjo ogroženosti, lahko objekte razvrstimo v razrede ogroženosti, kar nam da nekoliko boljšo predstavo o ogroženosti objektov. Na sliki 56 je prikazan primer razvrstitve objektov v razrede ogroženosti glede na indeks ranljivosti I_R . Pri tem so zaradi lažje primerjave med metodami pri vseh metodah upoštevani enaki kriteriji. Pri metodi z indeksom γ_3 ($q = 2.25$) bi bilo 748 objektov z zanemarljivo ali nizko potresno ogroženostjo, 1468 objektov s srednjo potresno ogroženostjo in 408 objektov z visoko potresno ogroženostjo. Podobne vrednosti dobimo pri metodi RISK-UE, 2. nivo, pri metodi RISK-UE, 1. nivo, pa bilo 1203 objektov z zanemarljivo ali nizko potresno ogroženostjo, 1337 objektov s srednjo in 84 objektov z visoko potresno ogroženostjo.

5 STANJE SLOVENSКИH SAKRALNIH STAVB

5.1 Splošno

Sakralne stavbe so, kot vsi gradbeni objekti, podvrženi različnim vplivom, ki lahko povzročajo poškodbe in propadanje materialov. Pri sakralnih objektih, ki so večinoma opredeljeni kot kulturni spomeniki ali kulturna dediščina, so poškodbe lahko tudi nepopravljive, zato je poznavanje stanja poškodb in odkrivanje vzrokov za poškodbe tu še toliko bolj pomembno. Le ob poznavanju stanja objektov in vzrokov za poškodbe je mogoče načrtovati ukrepe za sanacijo in preprečitev nadaljnega povečevanja poškodb. V nadaljevanju je prikazano nekaj tipičnih poškodb obravnavanih objektov (slike 57–66).



a) Bovec - Cerkev sv. Urha. Odpadanje ometa s stropa (foto: Popović, M., 2006).



b) Bovec - Cerkev sv. Urha. Odpadanje simsa (foto: Popović, M., 2006).



c) Bovec - Cerkev sv. Urha. Odpadanje simsa (foto: Popović, M., 2006).



č) Turnišče - Cerkev Marijinega vnebovzjetja. Odpadanje ometa v območju okenske špaleta (Bosiljkov, Gostič, 2009).

Slika 57: Fotografije nekaterih karakterističnih poškodb za cerkve: odpadanje ometa ali nekonstrukcijskih elementov

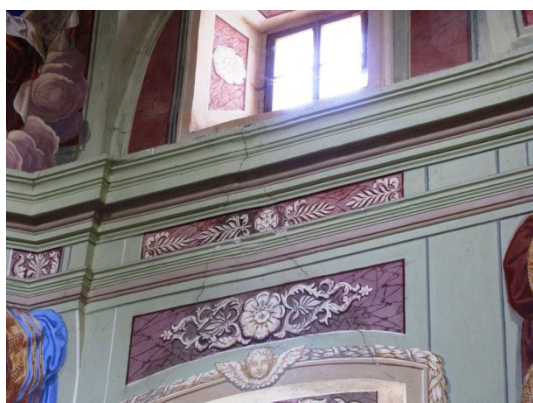
Figure 57: Photographs of some typical damages to churches: detachment of plaster or nonstructural elements



a) Drežnica - Cerkev sv. Srca Jezusovega. Razpoka na zvoniku (foto: Štampfl, A., 2010).



b) Ljubljana - Cerkev sv. Florijana. Razpoke nad vratno odprtino (Bosiljkov, Gostič, 2009).



c) Log pri Vipavi - Cerkev Matere božje Tolažnice žalostnih. Razpoke med okensko in vratno odprtino (Bosiljkov, Gostič, 2009).



č) Maribor - Cerkev sv. Alojzija. Razpoke med okensko in vratno odprtino (Bosiljkov, Gostič, 2009).



d) Selo na Goričkem - Cerkev sv. Nikolaja. Vertikalna razpoka na stiku apside z osnovnim delom objekta (Bosiljkov, Gostič, 2009).



e) Tolmin - Cerkev sv. Urha. Razpoka na zidu (foto: Popović, M., 2009).

Slika 58: Fotografije nekaterih karakterističnih poškodb za cerkve: razpoke na zidovih

Figure 58: Photographs of some typical damages to churches: cracks in walls



a) Ljubljana - Cerkev sv. Florijana. Razpoke na oboku (Bosiljkov, Gostič, 2009).



b) Ljubljana - Cerkev sv. Petra. Mrežaste razpoke na kupoli (Bosiljkov, Gostič, 2009).



c) Log pri Vipavi - Cerkev Matere božje Tolažnice žalostnih. Razpoka na stiku loka in oboka (Bosiljkov, Gostič, 2009).



č) Nova Štifta - Cerkev Marijinega vnebovzjetja. Razpoke na stiku loka in stebra (Bosiljkov, Gostič, 2009).



d) Postojna - Cerkev sv. Štefana. Razpoke na kupoli (foto: Štampfl, A., 2005).



e) Predenca - Cerkev sv. Roka. Razpoke na loku (Bosiljkov, Gostič, 2009).

Slika 59: Fotografije nekaterih karakterističnih poškodb za cerkve: razpoke na kupolah, obokih in lokih

Figure 59: Photographs of some typical damages to churches: cracks in domes, vaults, and arches



a) Bovec - Cerkev sv. Urha. Razpoka v tlaku (foto: Popović, M., 2006).



b) Ljubljana - Cerkev sv. Florijana. Poškodovano stopnišče (Bosiljkov, Gostič, 2009).



c) Log pri Vipavi - Cerkev Matere božje Tolažnice žalostnih. Poškodbe v tlaku (Bosiljkov, Gostič, 2009).



č) Svete gore - Cerkev Matere božje. Mrežaste razpoke v tlaku (Bosiljkov, Gostič, 2009).



d) Predenca - Cerkev sv. Roka. Razpoka v tlaku (Bosiljkov, Gostič, 2009).



e) Tunjice - Cerkev sv. Ane. Razpoka na stopnici (Bosiljkov, Gostič, 2009).

Slika 60: Fotografije nekaterih karakterističnih poškodb za cerkve: razpoke v tlakih

Figure 60: Photographs of some typical damages to churches: cracks in floors



a) Drežnica - Cerkev sv. Srca Jezusovega. Poškodbe simsa zaradi neustrezne izvedbe ali poškodovanosti žlebov (foto: Štampfl, A., 2010).



b) Kobarid - Cerkev sv. Antona Padovanskega. Poškodbe na fasadi zvonika zaradi zatekanja meteorne vode z zvonišča (foto: Popović, M., 2006).



c) Ljubljana - Cerkev sv. Petra. Močne poškodbe fasade v območju žlebov in odtočnih cevi (Bosiljkov, Gostič, 2009).



č) Tunjice - Cerkev sv. Ane. Sledovi zamakanja na simsu (Bosiljkov, Gostič, 2009).



d) Nova Štifta - Cerkev Marijinega vnebovzetja. Poškodbe na simsu in loku v območju žleba (Bosiljkov, Gostič, 2009).



e) Turnišče - Cerkev Marijinega vnebovzetja. Poškodbe na podzidku v območju odtočne cevi (Bosiljkov, Gostič, 2009).

Slika 61: Fotografije nekaterih karakterističnih poškodb za cerkve: poškodbe na fasadah zaradi neustreznega odvodnjavanja meteorne vode

Figure 61: Photographs of some typical damages to churches: damages to façades due to inadequate gutter system



a) Ljubljana - Cerkev sv. Petra. Močno zamakanje ob okenski odprtini (Bosiljkov, Gostič, 2009).



b) Ljubljana - Cerkev sv. Frančiška Asiškega v Šiški. Sledovi zamakanja pod okensko odprtino (Bosiljkov, Gostič, 2009).



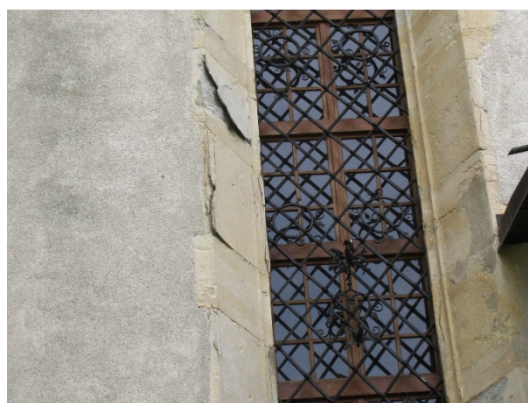
c) Ljubljana - Cerkev sv. Janeza Krstnika v Trnovem. Poškodbe ometa ob okenski odprtini (Bosiljkov, Gostič, 2009).



č) Ljubljana - Cerkev sv. Janeza Krstnika v Trnovem. Sledovi zamakanja pod okensko odprtino (Bosiljkov, Gostič, 2009).



d) Log pri Vipavi - Cerkev Matere božje Tolažnice žalostnih. Poškodbe zaradi zatekanje vode v območju okenske preklade (Bosiljkov, Gostič, 2009).



e) Predenca - Cerkev sv. Roka. Razpadanje kamna na okenski špaleti (Bosiljkov, Gostič, 2009).

Slika 62: Fotografije nekaterih karakterističnih poškodb za cerkve: poškodbe na fasadah zaradi zatekanja vode ob odprtinah

Figure 62: Photographs of some typical damages to churches: damages to façades due to leaking of water in the area of openings



a) Drežnica - Cerkev sv. Srca Jezusovega. Sledovi zamakanja in poškodbe na stropu in zidu (foto: Štampfl, A., 2010).



b) Kobarid - Cerkev sv. Antona Padovanskega. Poškodbe na oboku zaradi zamakanja (foto: Popović, M., 2007).



c) Ljubljana - Cerkev sv. Petra. Sledovi zamakanja na oboku (Bosiljkov, Gostič, 2009).



č) Log pri Vipavi - Cerkev Matere božje Tolažnice žalostnih. Odpadanje ometa na stropu zaradi zamakanja (Bosiljkov, Gostič, 2009).



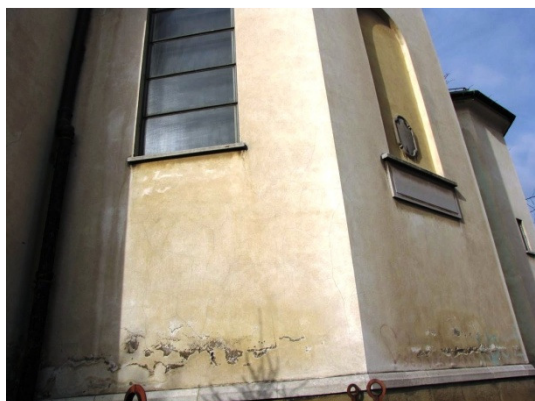
d) Maribor - Cerkev sv. Alojzija. Poškodbe zaradi zamakanja na oboku (Bosiljkov, Gostič, 2009).



e) Tolmin - Cerkev sv. Urha. Močno poškodovan omet na steni (foto: Popović, M., 2009).

Slika 63: Fotografije nekaterih karakterističnih poškodb za cerkve: poškodbe v notranjosti zaradi zamakanja

Figure 63: Photographs of some typical damages to churches: damages to interior surfaces due to leaking



a) Ljubljana - Cerkev sv. Petra. Poškodbe zaradi kapilarne vlage na fasadi (Bosiljkov, Gostič, 2009).



b) Maribor - Cerkev sv. Alojzija. Poškodbe zaradi kapilarne vlage na podzidku (Bosiljkov, Gostič, 2009).



c) Nova Štifta - Cerkev Marijinega vnebovzetja. Poškodbe zaradi kapilarne vlage na notranjih zidovih (Bosiljkov, Gostič, 2009).



č) Predenca - Cerkev sv. Roka. Poškodbe zaradi kapilarne vlage na notranjih zidovih (Bosiljkov, Gostič, 2009).



d) Slovenske Konjice - Cerkev sv. Jurija. Poškodbe zaradi kapilarne vlage na fasadi (Bosiljkov, Gostič, 2009).



e) Tolmin - Cerkev sv. Urha. Poškodbe zaradi kapilarne vlage na notranjih zidovih (foto: Popović, M., 2009).

Slika 64: Fotografije nekaterih karakterističnih poškodb za cerkve: poškodbe zidov zaradi kapilarne vlage

Figure 64: Photographs of some typical damages to churches: damages to walls due to capillary moisture



a) Drežnica - Cerkev sv. Srca Jezusovega. Dotrajana strešna kritina (foto: Štampfl, A., 2010).



b) Drežnica - Cerkev sv. Srca Jezusovega. Poškodovana strešna lega zaradi zamakanja (foto: Štampfl, A., 2010).



c) Bovec - Cerkev sv. Urha. Sledovi zamakanja na opažu (foto: Popović, M., 2006).



č) Nova Štifta - Cerkev Marijinega vnebovzetja. Sledovi zamakanja na opažu in strešni legi (Bosiljkov, Gostič, 2009).



d) Tolmin - Cerkev sv. Urha. Poškodbe ostrešja zaradi zamakanja. Povešen strešni poveznik (foto: Popović, M., 2009).



e) Visoko pod Kureščkom - Cerkev sv. Nikolaja. Poškodovana ali dotrajana strešna kritina (Bosiljkov, Gostič, 2009).

Slika 65: Fotografije nekaterih karakterističnih poškodb za cerkve: poškodbe streh in ostrešij
Figure 65: Photographs of some typical damages to churches: damages to roofs and roof trusses



a) Maribor - Cerkev sv. Alojzija. Poraščenosť na fasadi (Bosiljkov, Gostič, 2009).



b) Martjanci - Cerkev sv. Martina. Vegetacija na zgornji površini stenskega opornika (Bosiljkov, Gostič, 2009).



c) Svete gore - Kapela sv. Jurija. Prekomerna poraščenosť v bližini objekta (Bosiljkov, Gostič, 2009).



č) Svete gore - Kapela sv. Martina. Prekomerna poraščenosť v bližini objekta (Bosiljkov, Gostič, 2009).

Slika 66: Fotografije nekaterih karakterističnih poškodb za cerkve: vegetacija

Figure 66: Photographs of some typical damages to churches: vegetation

5.2 Nabor objektov za analizo

Nabor objektov za analizo je enak kot pri analizi potresne ogroženosti objektov (pog. 4.2). Pri tem obravnavamo le tiste objekte, za katere imamo na razpolago ustrezno fotodokumentacijo in katastre poškodb. Skupno smo tako obravnavali 59 od 64 objektov.

5.3 Izbira metode

Pregled literature je pokazal, da so v svetu že razvite metode za ocenjevanja stanja sakralnih objektov, vendar predvsem za ocenjevanje poškodb po potresih. Manj je to razvito za ocenjevanje splošnega stanja sakralnih objektov. V sklopu naloge bomo na naboru slovenskih sakralnih objektov preverili makroseizmično metodo metodologije RISK-UE na 2. nivoju, ki obravnava oceno stanja v smislu poškodb zaradi potresa. Za oceno splošnega stanja objektov bomo uporabili metodo za ocenjevanja stanja mostov, ki jo bomo prilagodili za potrebe sakralnih objektov.

5.4 Ocenjevanje potresnih poškodb za cerkve

5.4.1 Opis metode

Makroseizmična metoda na 2. nivoju (RISK-UE) poleg določevanja indeksa potresne ranljivosti predvideva tudi ocenjevanje poškodovanosti cerkva. Izhodišča metode so opisana v poglavju 4.7.1. Kot smo že opisali, metoda temelji na razdelitvi cerkve na posamezne makroelemente in vrednotenju aktiviranja pripadajočih porušnih mehanizmov. Predpostavljeno je 28 možnih porušnih mehanizmov, enakih kot pri ocenjevanju ranljivosti (preglednica 17). Vsakemu mehanizmu se na podlagi vizualnega ogleda pripiše stopnjo poškodovanosti, ki ustreza opisu poškodb pri makroseizmični lestvici EMS-98 (slika 48), pri čemer je petim stopnjam definiranih v EMS-98 dodana še stopnja 0 – brez poškodb. Indeks poškodovanosti objekta i_d se izračuna kot normirana vsota prispevkov poškodovanosti posameznih makroelementov, pomnoženimi z utežmi glede na njihovo relativno pomembnost:

$$i_d = \frac{1}{5} \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k d_k}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k}, \quad (63)$$

kjer oznake pomenijo:

i_d indeks poškodovanosti objekta (0–1.0),

ρ_k faktor pomembnosti k -tega porušnega mehanizma (0.5–1.0),

d_k stopnja poškodovanosti oziroma aktiviranja k -tega porušnega mehanizma (0–5).

Indeks poškodovanosti i_d tako predstavlja povprečno poškodovanost cerkve glede na možne porušne mehanizme. Avtorji (Lagomarsino, 1999) podajajo tudi povezavo med indeksom poškodovanosti i_d in stopnjo poškodovanosti objekta po EMS-98, ki je pridobljena na osnovi ekspertne presoje (preglednica 23).

Preglednica 23: Stopnja poškodovanosti za cerkve glede na indeks poškodovanosti (Lagomarsino, 1999: str. 12)

Table 23: Definition of structural damage levels for the churches, based on the damage index. (Lagomarsino, 1999: p. 12)

Stopnja poškodovanosti EMS-98	Indeks poškodovanosti i_d	Opis
0	$i_d \leq 0.05$	<u>Brez poškodb</u> : lahke poškodbe v enem ali dveh mehanizmih
1	$0.05 < i_d \leq 0.25$	<u>Zanemarljiva do rahla poškodovanost</u> : lahke poškodbe v nekaj mehanizmih
2	$0.25 < i_d \leq 0.4$	<u>Zmerna poškodovanost</u> : lahke poškodbe v mnogo mehanizmih, srednje poškodbe v enem ali dveh mehanizmih
3	$0.4 < i_d \leq 0.6$	<u>Znatna do močna poškodovanost</u> : srednje poškodbe v veliko mehanizmih, močne poškodbe v nekaj mehanizmih
4	$0.6 < i_d \leq 0.8$	<u>Zelo močna poškodovanost</u> : močne poškodbe v veliko mehanizmih, porušitev nekaterih makroelementov
5	$i_d > 0.8$	<u>Porušitev</u> : zelo močne poškodbe pri vsaj 2/3 mehanizmov

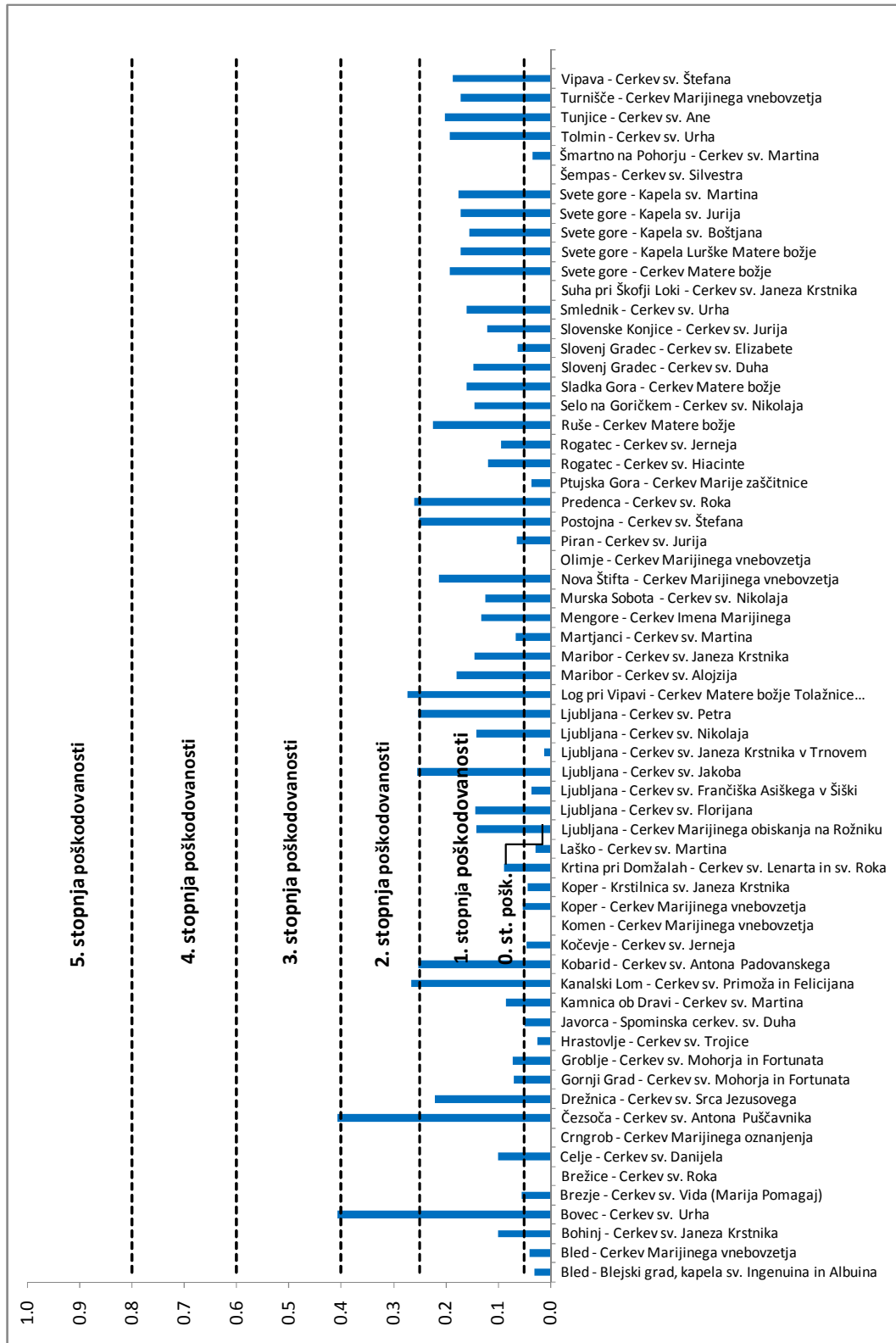
5.4.2 Analiza in rezultati

Za nabor objektov smo izračunali indekse poškodovanosti z uporabo enačbe (63). Rezultati so grafično prikazani na sliki 67 in tabelarično v preglednici 18.

Skladno s pričakovanji najvišji indeks poškodovanosti dosega cerkve v zgornjem Posočju poškodovane ob nedavnih potresih (obravnavamo jih v nesanimiranem stanju). Najbolj sta poškodovani cerkvi: Bovec - Cerkev sv. Urha ($i_d = 0.407$) in Čezsoča - Cerkev sv. Antona Puščavnika ($i_d = 0.407$), katerih poškodovanost lahko skladno s preglednico 23 uvrstimo v 3. stopnjo poškodovanosti (znatna do močna poškodovanost). Preostale obravnavane cerkve tega območja so manj poškodovane in se uvrščajo v 2. ali 1. stopnjo poškodovanosti: Kanalski Lom - Cerkev sv. Primoža in Felicijana ($i_d = 0.267$), Kobarid - Cerkev sv. Antona Padovanskega ($i_d = 0.253$), Drežnica - Cerkev sv. Srca Jezusovega ($i_d = 0.221$) in Tolmin - Cerkev sv. Urha ($i_d = 0.192$). Nekoliko je presenetljivo, da 2. stopnjo poškodovanosti izkazujejo tudi nekatere cerkve, ki sicer niso bile izpostavljene nedavnim potresom: Log pri Vipavi - Cerkev Matere božje Tolažnice žalostnih ($i_d = 0.275$), Predenca - Cerkev sv. Roka ($i_d = 0.260$), Ljubljana - Cerkev sv. Jakoba ($i_d = 0.255$), Ljubljana - Cerkev sv. Petra ($i_d = 0.253$), Postojna - Cerkev sv. Štefana ($i_d = 0.252$). Pri teh objektih je aktiviranje mehanizmov najverjetneje posledica diferenčnega posedanja temeljnih tal, neustreznega vzdrževanja in propadanja materialov, pa tudi morebitnih preteklih potresov. Velika večina obravnavanih objektov (85 %) se uvršča v razred poškodovanosti 0 (brez poškodb) ali 1 (zanemarljive do lahke poškodbe).

Komentar

Indeks poškodovanosti i_d izraža povprečno poškodovanost, česar se je potrebno zavedati pri interpretaciji rezultatov. Tako ta metoda kot kritičnega ne bi izpostavila npr. objekta, ki bi imel maksimalno aktiviran en mehanizem (porušen makroelement), ostali elementi pa bi bili znatno manj poškodovani, saj bi bila izračunana povprečna poškodovanost nizka. Dodatno pomanjkljivost vidimo tudi v tem, da poškodovanosti posameznih makroelementov določa več porušnih mehanizmov, ki so lahko med seboj odvisni ali neodvisni. Smatramo, da za maksimalno poškodovanost nekega elementa ne bi bilo potrebno maksimalno aktiviranje vseh mehanizmov, kot to izhaja iz definicije indeksa poškodovanost, temveč bi bila dovolj maksimalna poškodovanost enega izmed možnih mehanizmov. Za primer si oglejmo makroelement čelne fasade, kjer so možni sledeči mehanizmi: prevrnitev fasade, strižni mehanizem fasade in porušitev na vrhu fasade. V primeru porušitve fasade zaradi prevrnitve, bi tako mehanizmu prevrnitve pripisali maksimalno vrednost, strižnemu mehanizmu pa minimalno vrednost. Neaktiviran strižni mehanizem fasade bi tako zmanjševal vrednost indeksa poškodovanosti, kljub temu da je makroelement porušen. Podobno kot pri ugotavljanju indeksa ranljivosti tudi tu zaključimo, da pri interpretaciji rezultatov poleg izračunane končne vrednosti indeksa poškodovanosti potrebno preveriti tudi najbolj poškodovane makroelemente oziroma mehanizme z visokimi stopnjami poškodovanosti d_k .

Slika 67: Indeksi poškodovanosti i_d Figure 67: Damage indexes i_d

5.5 Metoda z ratingi objekta

5.5.1 Opis osnovne metode

Metoda je bila v osnovi razvita za ocenjevanje stanja armiranobetonskih premostitvenih objektov. Osnove metode so podane v (Žnidarič, J., Žnidarič, A., 1994 in Žnidarič, Peruš, 1998). Modifikacija metode za uporabo na armiranobetonskih stavbah je podana v (Coronelli, 2007).

Metoda temelji na detajlnem pregledu objekta in klasifikaciji poškodb glede na njihovo lokacijo, intenziteto, obseg, vpliv na celotno konstrukcijo ter nujnost intervencije. Na osnovi pregleda objekta se določijo ratingi posameznih poškodb. Vsota ratingov vseh poškodb na objektu oziroma delu objekta predstavlja rating objekta oziroma dela objekta.

Vsako poškodbo se opiše s produktom petih faktorjev, kar predstavlja vrednost poškodovanosti poškodbe i :

$$V_{D,i} = B_i \cdot K_{1,i} \cdot K_{2,i} \cdot K_{3,i} \cdot K_{4,i} \cdot \quad (64)$$

Poškodovanost posameznega elementa se določi kot vsoto vseh poškodb i , prisotnih na elementu m :

$$F_m = \sum_i V_{D,i} \cdot \quad (65)$$

Osnovni rating poškodovanosti objekta ali dela objekta se izračuna kot vsota poškodovanosti vseh elementov m :

$$R = \sum_m F_m = \sum_m \sum_i V_{D,i} \cdot \quad (66)$$

Oznake v gornjih enačbah pomenijo:

- R osnovni rating poškodovanosti objekta,
- F_m vrednost poškodovanosti elementa m ,
- $V_{D,i}$ vrednost poškodovanosti za tip poškodbe i ,
- B_i osnovna vrednost poškodbe tipa i (vrednosti 1–4),
- $K_{1,i}$ faktor pomembnosti elementa, na katerem je prisotna poškodba i (vrednosti 0.1–1),
- $K_{2,i}$ faktor intenzitete poškodbe i (vrednosti 0.5–2),
- $K_{3,i}$ faktor razširjenosti poškodbe i glede na obravnavani element (vrednosti 0.5–2),
- $K_{4,i}$ faktor nujnosti intervencije (vrednosti 1–5).

Osnovni rating poškodovanosti R izraža vsoto vseh poškodb na objektu. Ta verzija metodologije je že več let v uporabi v Sloveniji pri rednih pregledih mostov. Slabost te metode je, da ne podaja

informacije o maksimalni vrednosti ratinga objekta. Ta je odvisen od števila različnih elementov, ki sestavljajo objekt in vrednosti vseh možnih poškodb. Medsebojna primerjava ratingov konstrukcijsko zelo različnih objektov tako ni najbolj korektna. V izogib navedeni pomanjkljivosti je predlagano (Žnidarič, Peruš, 1998), da se rating objekta normira z referenčno vrednostjo $\sum F_{m,ref}$, ki izraža vsoto vseh možnih poškodb na vseh elementih, ki sestavljajo objekt. Določi se jo z enačbo (66), pri čemer se pri določitvi $V_{D,i}$ upošteva $K_{2,i} = K_{3,i} = 2$, $K_{4,i} = 1$. Rating objekta tako predstavlja razmerje med dejansko poškodovanostjo in maksimalno možno poškodovanostjo, če se pri slednji ne upošteva faktorja nujnosti intervencije. Referenčna vrednost ni konstantna, temveč se razlikuje od objekta do objekta.

V primeru mostov se celotno konstrukcijo razdeli na več sklopov: spodnja konstrukcija, prekladna konstrukcija, krov in oprema. Za vsak element posameznega sklopa so definirani tipi možnih poškodb s pripadajočimi vrednostmi osnovnih vrednosti B_i , faktorji pomembnosti $K_{1,i}$ ter kriteriji za določitev vrednosti faktorjev $K_{2,i}$, $K_{3,i}$ in $K_{4,i}$. Ratingi poškodovanosti se lahko določijo za celoten objekt za posamezen sklop ali pa za posamezen element. Glede na dosežene ratinge je mogoče objekte (ali dele objektov) razvrstiti v razrede poškodovanosti, iz katerih je moč sklepati na stanje objektov in na nujnost ukrepov.

5.5.2 Modifikacija metode za cerkve

Da bi metodo uporabili za sakralne objekte, so potrebne določene spremembe. Opraviti imamo s povsem drugačnimi konstrukcijami, kot so mostovi, tako po zasnovi, materialih in funkciji. Kljub temu pa bo osnovna ideja enaka kot pri mostovih: stanje objekta oz. rating objekta bo izražala vsota indeksov nastopajočih poškodb.

Ker se poškodbe nanašajo na elemente, je potrebno najprej definirati elemente, ki sestavljajo objekt, ter nato definirati možne poškodbe. Hitro lahko ugotovimo, da sakralni objekt sestavljajo elementi, ki imajo različne funkcije, njihove poškodbe pa različne posledice. To nas napeljuje, da je obravnavo elementov smiselno ločiti po njihovi funkciji. Ugotovimo tudi, da so sakralni objekti praviloma arhitekturno precej razčlenjeni, vendar pa posamezna območja sestavljajo podobni elementi s podobnim naborom možnih poškodb. Zato je za posamezna območja smiselno upoštevati enake elemente, njihovo večjo ali manjšo pomembnost pa zajeti z dodatnim faktorjem pomembnosti posameznega območja. Poleg faktorja pomembnosti elementa K_1 , ki je enak vsem istovrstnim elementom, tako vpeljemo še faktor območja K_o , ki izraža pomembnost posameznega območja, kjer se element nahaja. Vrednost poškodovanosti za poškodbo i se tako določi z enačbo:

$$V_{D,i} = K_o \cdot B_i \cdot K_{1,i} \cdot K_{2,i} \cdot K_{3,i} \cdot K_{4,i} \cdot \quad (67)$$

Rating poškodovanosti objekta določimo na enak način kot pri mostovih z enačbo (66).

Za potrebe naloge celotni sakralni objekt razdelimo na posamezna območja. Vsako območje razdelimo na sklope, glede na njihovo funkcijo. Posamezne sklope, predvsem zaradi lažje identifikacije elementov, nadalje razdelimo na podsklope glede na njihove skupne značilnosti, te pa nadalje na posamezne elemente, na katere se nanašajo obravnavane poškodbe.



Slika 68: Potek razdelitve objekta

Figure 68: Division of structure

5.5.2.1 Območja objekta in faktor območja K_o

Razdelitev objekta na posamezna območja naredimo iz dveh razlogov. Prvi razlog izhaja iz predpostavke, da se posamezna območja med seboj razlikujejo glede pomembnosti. V smislu vpliva poškodb na varnosti celotnega objekta so tako npr. elementi glavne ladje bolj pomembni od elementov zakristije ali elementov nartekse. Drugi razlog pa je lažja identifikacija poškodb oziroma omejitev obsega elementov, na katere se poškodbe nanašajo.

Kot najbolj naravna se kaže delitev na območja, ki ustreza poimenovanju prostorskih enot v umetnostnozgodovinski stroki (glavna ladja, stranska ladja, zakristija, zvonik ...). Takšna delitev večinoma zajame tudi konstrukcijsko različnost posameznih območij. V preglednici 24 je podan nabor območij, pri čemer se ta prilagaja glede na zasnovo posameznega objekta. Na sliki 69 je prikazan primer razdelitve objekta na območja.

Preglednica 24: Seznam območij

Table 24: List of regions

Območje	Oznaka	Območje	Oznaka
glavna ladja	GL	prezbiterij (apsida + kor)	Pr
stranska ladja 1	SL1	kapela 1	Ka1
stranska ladja 2	SL2	kapela 2	Ka2
prečna ladja – krilo 1	PL1	zakristija	Za
prečna ladja – krilo 2	PL2	nartekse	Na
križiščni prostor	KrP	zahodni predprostor	ZP
apsida glavne ladje	Ap	pomožni prostor	PP
apsida stranske ladje	Ap-SL1	pevska empore	PE
apsida stranske ladje	Ap-SL2	zvonik 1	ZV1
kor (del prezbiterija)	Ko	zvonik 2	ZV2

Pomembnost posameznega območja izraža faktor pomembnosti območja K_o . Če naj pomembnost prostora odraža predvsem vidik varnosti, potem je K_o odvisen od velikosti prostora. Kot prva opcija za določitev K_o se ponuja razmerje tlorisnih površin posameznih območij. V tem primeru bi bili izrazito

podcenjeni zvoniki, ki imajo običajno majhno tlorisno površino glede na ostala območja, precenjene pa npr. zakristije, ki so običajno mnogo nižje od osnovnega dela objekta. Za določitev K_o zato upoštevamo volumsko razmerje posameznih prostorov glede na volumen celotnega objekta:

$$K_{o,n} = \frac{V_{o,n}}{V_{o,tot}}, \quad (68)$$

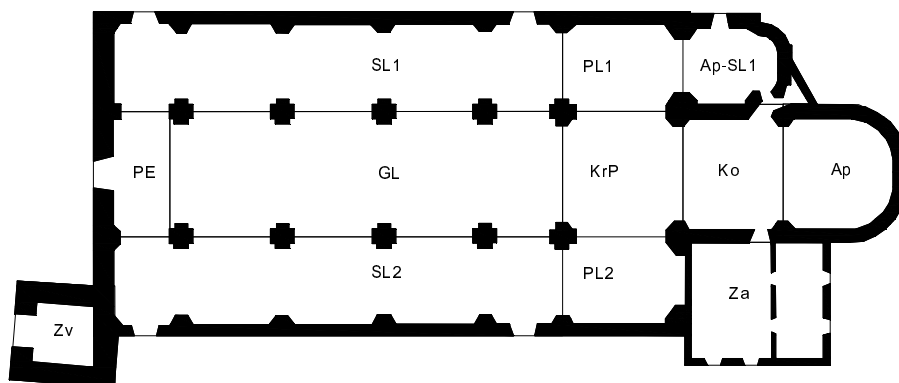
kjer je:

$K_{o,n}$ faktor pomembnosti območja n (vrednosti < 1),

$V_{o,n}$ prostornina območja n ,

$V_{o,tot}$ skupna prostornina vseh območij.

Očitno je, da so pri takšni definiciji vrednosti faktorjev manjši od 1, vsota faktorjev pomembnosti vseh območij pa je enaka 1. Na ta način bodo vrednosti poškodovanosti posameznih prostorov izražale relativno poškodovanost glede na celoten objekt, s čimer se zmanjša vliv raznolikosti tlorisnih zasnov objektov na vrednost ratinga celotnega objekta. Posebnost pri določitvi faktorja pomembnosti predstavlja pevska empora, ki je običajno umeščena znotraj prostora glavne ladje ali drugih območij. Za volumen območja tu upoštevamo samo prostor pod pevsko emporo. Drug problem je, kam uvrstiti elemente na meji med dvema območjema. Izberemo pravilo, da se mejne elemente pripiše k območju z večjim faktorjem območja K_o .



Slika 69: Primer razdelitve objekta na območja (cerkev Marijinega vnebovzetja, Koper)

Figure 69: Example of division of the structure into regions (church of Assumption of Mary, Koper)

5.5.2.2 Sklopi in podsklopi

Objekt oziroma posamezna območja objekta razdelimo na funkcionalne sklope, ki se nadalje delijo na podsklope (slika 70). Ločimo tri sklope, in sicer: *nosilna konstrukcija*, *zaščitna konstrukcija* in *kulturna dediščina*. V okviru naloge bomo podrobneje obravnavali sklop nosilna konstrukcija in sklop zaščitna konstrukcija. Obravnava tretjega sklopa, ki zajema elemente kulturne dediščine, presega okvire te naloge, najverjetneje bi pa bilo mogoče tudi ta sklop zajeti z obravnavano metodo.

5.5.2.2.1 Sklop: nosilna konstrukcija (NK)

Nosilna konstrukcija zagotavlja varnost in stabilnost objekta tako pri rednih kot izrednih obtežbah (npr. potres). Poleg tega mora zagotavljati tudi ustrezno osnovo za druge sklope, saj so mnogi elementi kulturne dediščine in tudi ovoja neposredno ali posredno povezani z nosilno konstrukcijo. Nosilno konstrukcijo razdelimo na štiri podsklope glede na njihovo vlogo pri prevzemanju obtežb, in sicer na: *vertikalno konstrukcijo*, *horizontalno konstrukcijo*, *ostrešje* in *stopnišče*. Pri tem lahko *vertikalno* in *horizontalno konstrukcijo* označimo kot *primarno nosilno konstrukcijo*, *ostrešje* in *stopnišče* pa kot *sekundarno nosilno konstrukcijo*.

Vertikalno konstrukcijo sestavljajo zidovi, stebri in slopi. Večinoma so to masivni elementi, grajeni iz kamna ali opeke, lahko pa so grajeni tudi iz lesa, ali v primeru novejših objektov iz armiranega ali nearmiranega betona.

Horizontalno konstrukcijo predstavljajo stropovi, katerih zasnovo narekuje predvsem izbira uporabljenega materiala. Oboki in kupole so večinoma v masivni izvedbi grajeni iz kamna ali opeke, lahko pa so tudi v leseni izvedbi. Ravni stropovi so večinoma v leseni izvedbi in so lahko tudi del strešne konstrukcije. Pri novejših objektih je pri obeh tipih stropov možna armiranobetonska izvedba. Cerkev je lahko tudi brez stropa, tako da je vidna konstrukcija ostrešja.

Ostrešja so v večini primerov v leseni izvedbi, stopnišča pa v leseni, masivni ali kovinski izvedbi.

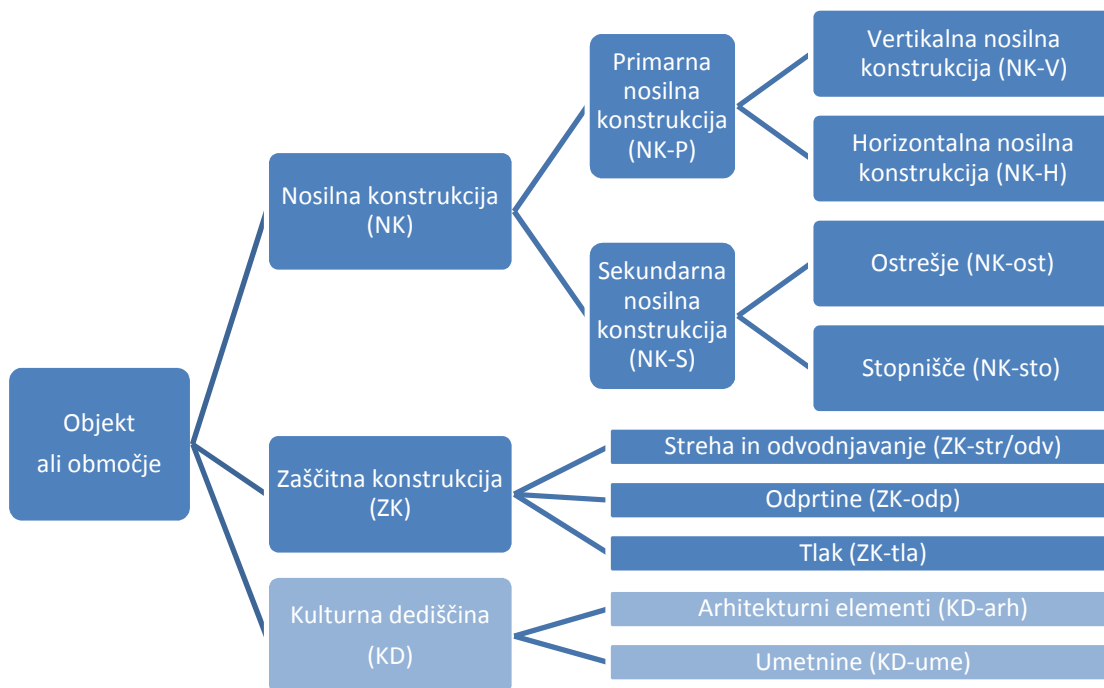
5.5.2.2.2 Sklop: zaščitna konstrukcija (ZK)

Zaščitna konstrukcija ščiti nosilno konstrukcijo in elemente kulturne dediščine pred zunanjimi vplivi ter zagotavlja ustrezne pogoje za uporabo objekta. Zaščitno konstrukcijo sestavljajo podsklopi: *streha s sistemom za odvodnjavanje meteorne vode*, *odprtine* in *tlaki*. V okviru naloge se pri funkciji zaščitne konstrukcije omejimo predvsem na zaščito pred vlago in vodo, ki lahko povzroča številne poškodbe tako nosilne konstrukcije kot elementov kulturne dediščine. V podsklop *tlaki* spadajo tlaki znotraj in zunaj cerkve, sem pa uvrstimo tudi bližnjo okolico objekta, ki lahko vpliva na nosilno konstrukcijo, zaščitno konstrukcijo ter posredno ali neposredno na elemente kulturne dediščine. Bližnja okolica objekta mora biti urejena tako, da ne povzroča poškodb na nosilni in zaščitni konstrukciji. Tu je mišljena predvsem prekomerna vegetacija, ki lahko poškoduje tlake in temelje, zamaši žlebove in odtoke ali povzroča biološke poškodbe.

5.5.2.2.3 Sklop: kulturna dediščina (KD)

Poseben sklop, ki ga v okviru naloge sicer podrobneje ne obravnavamo, predstavljajo elementi kulturne dediščine, ki jih je potrebno varovati zaradi njihovega kulturnozgodovinskega pomena. Na ta sklop lahko vplivajo vsi prej navedeni sklopi. Elemente kulturne dediščine lahko delimo na

arhitekturne elemente in umetniške elemente. Arhitekturni elementi so vezani na elemente nosilne konstrukcije (npr. elementi fasade) ali pa so kar njihov sestavni del (npr. kapitel stebra). Umetniški elementi so ravno tako lahko neločljivo povezani z nosilno konstrukcijo (npr. freska, mozaik, štukatura), ali z elementi zaščitne konstrukcije (npr. vitraž), lahko pa so z nosilno konstrukcijo povezani bolj posredno (npr. slika, kip, oltar).



Slika 70: Razdelitev območij na sklope in podskepe

Figure 70: Division of regions into assemblies and subassemblies

5.5.2.3 Elementi, poškodbe in faktorji poškodb

Za potrebe naloge je potrebno definirati možne poškodbe, ki lahko nastopajo na posameznih elementih. Nabor možnih poškodb posameznega elementa je odvisen od vrste materiala ter od vrste elementa. Za vsak element je potrebno določiti faktorje pomembnosti elementa $K_{1,i}$, definirati, katere poškodbe lahko nastopajo na posameznem elementu, ter določiti vrednosti in kriterije za faktorje B_i , $K_{2,i}$, $K_{3,i}$ in $K_{4,i}$.

5.5.2.3.1 Faktor tipa poškodbe B_i

Faktor B_i predstavlja osnovno vrednost poškodbe tipa i in izraža možne posledice poškodbe na nosilnost in/ali trajnost elementa, kjer se poškodba nahaja. Vrednost je neodvisna od pomembnosti elementa. Razpon vrednosti privzamemo po osnovni metodologiji (Žnidarič, Peruš, 1998), kjer vrednosti znašajo od 1 do 4. Predlog vrednosti faktorjev za posamezne tipe poškodb je podan v preglednici 25.

Preglednica 25: Nabor tipov poškodb s pripadajočimi osnovnimi vrednostmi B_i in posebni kriteriji za določitev intenzitete poškodb $K_{2,i}$ določenih tipov poškodb

Table 25: List of damage types with associated basic values B_i and special criteria for evaluation of the damage intensity $K_{2,i}$ for certain damage types

Tip poškodbe	Sklop	Vrsta elementa in materiala	B_i	Kriterij za intenziteto poškodb ($K_{2,i}$)			
				A	B	C	D
Konstrukcijske razpoke (zaradi preobremenitve ali posedanja)	NK	kamniti ali opečni zidovi, stebri, stropovi, stopnišča	4	< 1 mm	1.0–3.0 mm	3.0–10.0 mm	> 10.0 mm
	ZK	tlaki	4				
Nekonstrukcijske razpoke (tehnološke razpoke, mrežaste razpoke, razpoke na stikih elementov)	NK	kamniti ali opečni zidovi, stebri, stropovi, stopnišča	1	< 1 mm	1.0–3.0 mm	3.0–10.0 mm	> 10.0 mm
	ZK	tlaki	1				
Poškodbe ometa (odpadanje ometa, zidnih vencev ...)	NK	kamniti ali opečni zidovi, stebri, stropovi, stopnišča, ometani leseni stropovi	2	površinske poškodbe	odstopanje ometa,	odpadanje ometa	odpadanje velikih kosov
Poškodbe opleska	NK	kamniti ali opečni zidovi, stebri, stropovi, stopnišča, ometani leseni stropovi	1	sprememba barve, obledelost	delno luščenje	močno luščenje	oplesk je povsem uničen
Poškodbe zaradi prekomerne kapilarne vlage	NK	kamniti ali opečni zidovi, stebri	2	< 20 % (nasičene masne vlage)	20–50 % (nasičene masne vlage)	50–80 % (nasičene masne vlage)	> 80 % (nasičene masne vlage)
	ZK	tlaki	2				
Poškodbe zaradi zamakanja	NK	kamniti ali opečni zidovi, stebri, stropovi, leseni elementi ostrešja	2	majhna	srednja	močna	zelo močna
Vertikalni premik, diferenčni posedki	NK	kamniti ali opečni zidovi, stebri	3	< 0.5 cm	0.5–2.0 cm	2.0–5.0 cm	> 5.0 cm
	ZK	tlaki	4				
Horizontalni premik, izklon	NK	kamniti ali opečni zidovi, stebri, elementi ostrešja	3	< H/300	H/300–3H/300	3H/300–5H/300	> 5H/300
Poves	NK	leseni elementi stropov in ostrešij	2	< L/250	L/250–3L/250	3L/250–5L/250	> 5L/250
Lesna gniloba	NK	vsi leseni elementi	3	majhna	srednja	močna	zelo močna
Črvihost, lesna goba	NK	vsi leseni elementi	2	majhna	srednja	močna	zelo močna
Korozija	NK	železna vezna sredstva ostrešja, zidne vezi, natezne vezi	3	Sledovi korozije, ni zmanjšanja prereza	Zmanjšanje prereza za do 10 %	Zmanjšanje prereza za 10–25 %	Zmanjšanje prereza za > 25 %, pretrg armature
Manjka element	NK	elementi ostrešja in stopnišča	2	majhna	srednja	močna	zelo močna
	ZK	elementi odvodnjavanja in odprtih	3				
Dotrajanost	ZK	kritina, elementi odvodnjavanja, elementi odprtih	2	majhna	srednja	močna	zelo močna
Mehanska poškodba	ZK	elementi odvodnjavanja in odprtih	3	majhna	srednja	močna	zelo močna
Nevodotesnost	ZK	kritina, elementi odvodnjavanja in odprtih	4	majhna	srednja	močna	zelo močna
Neustrezna izvedba	ZK	elementi odvodnjavanja	3	majhna	srednja	močna	zelo močna
Zamašeno	ZK	elementi odvodnjavanja	2	majhna	srednja	močna	zelo močna
Neurejeno/poraščeno	ZK	okolica objekta, kritina	1	majhna	srednja	močna	zelo močna

5.5.2.3.2 Faktor pomembnosti elementa $K_{1,i}$

Faktor pomembnosti elementa $K_{1,i}$ izraža možne posledice poškodbe elementa na nosilnost in/ali trajnost obravnavanega dela objekta – območja. Predlog vrednosti faktorjev za posamezne elemente je podan v preglednici 26. Razpon vrednosti faktorjev znaša od 0.1 do 2. Podan je tudi razpon za vsoto faktorjev $\Sigma K_{1,i}$ za posamezne sklope (za posamezno območje), iz katerega je razvidna pomembnost posameznih sklopov.

Preglednica 26: Seznam elementov s pripadajočimi faktorji $K_{1,i}$

Table 26: List of elements with associated factors $K_{1,i}$

Sklop	Podsklop	Element	$K_{1,i}$	$\Sigma K_{1,i}$
NK	NK-V	4-stranski zid (npr. zvonik)	2.0	1.5–2.7
NK	NK-V	3-stranski zid (npr. prezbiterij)	1.5	
NK	NK-V	2-stranski zid (npr. vzdolžna zidova enoladijske cerkve)	1.0	
NK	NK-V	1-stranski zid (npr. vzdolžni zid stranske ladje, zid vhodne fasade, slavoločni zid, apsida, korni zaključek)	0.5	
NK	NK-V	prečni zidovi bočnih kapel	1.0	
NK	NK-V	zatrejni zid	0.3	
NK	NK-V	stebri glavne ladje	1.0	
NK	NK-V	zidne vezi	0.2	
NK	NK-V	zidovi in stebri zvonišča	0.5	
NK	NK-H	kupola brez tamburja	1.5	1.5–1.8
NK	NK-H	kupola s tamburjem (samo del kupole, brez tamburja)	1.0	
NK	NK-H	tambur (pri kupoli s tamburjem)	0.5	
NK	NK-H	obok brez reber ali lokov	1.5	
NK	NK-H	del oboka med rebri ali loki	1.0	
NK	NK-H	rebra ali loki	0.5	
NK	NK-H	slavolok	0.5	
NK	NK-H	raven strop	1.5	
NK	NK-H	natezna vez	0.3	
NK	NK-ost	ostrešje	0.5	do 1
NK	NK-ost	vezna sredstva ostrešja	0.2	
NK	NK-ost	ležišča in konzole ostrešja	0.3	
NK	NK-sto	stopnice	0.2	do 0.5
NK	NK-sto	podest stopnišča	0.2	
NK	NK-sto	ograja stopnišča	0.1	
ZK	ZK-str/odv	strešna kritina	0.3	0.3–0.9
ZK	ZK-str/odv	obrobe strešne kritine	0.2	
ZK	ZK-str/odv	žlebovi	0.2	
ZK	ZK-str/odv	vertikalne odtočne cevi	0.1	
ZK	ZK-str/odv	jaški in peskolovi	0.1	
ZK	ZK-odp	vrata	0.1	0.3
ZK	ZK-odp	okvir oken	0.1	
ZK	ZK-odp	zasteklitev oken	0.1	
ZK	ZK-tla	notranji tlak	0.1	0.3
ZK	ZK-tla	zunanj tlak	0.1	
ZK	ZK-tla	teren zunaj	0.1	

Pri določitvi vrednosti faktorjev upoštevamo, da so elementi nosilne konstrukcije v splošnem bolj pomembni od elementov zaščitne konstrukcije. Pri tem so elementi primarne nosilne konstrukcije bolj pomembni od elementov sekundarne konstrukcije. Znotraj elementov primarne nosilne konstrukcije so elementi vertikalne konstrukcije pomembnejši od elementov horizontalne konstrukcije, saj bi

porušitev vertikalne konstrukcije povzročila tudi porušitev horizontalne konstrukcije, obratno pa praviloma ne velja. V tem kontekstu je konstrukcija ostrešja manj pomembna od horizontalne konstrukcije, najmanj pa so pomembni elementi stopnišča. Podobno razmišljamo pri elementih zaščitne konstrukcije: elementi strehe in odvodnjavanja so bolj pomembni od elementov odprtih in tlakov.

5.5.2.3.3 Faktor intenzitete poškodbe $K_{2,i}$

Faktor $K_{2,i}$ izraža vpliv intenzitete poškodbe na nosilnost in/ali trajnost obravnavanega elementa. Razpon vrednosti privzamemo po osnovni metodologiji (Žnidarič, Peruš, 1998), kjer vrednosti znašajo od 0.5 do 2. Splošni kriteriji za določitev stopnje intenzitete poškodbe so podani v preglednici 27, predlog posebnih kriterijev za nekatere tipe poškodb pa v preglednici 25.

Preglednica 27: Splošni kriteriji za faktor intenzitete poškodb $K_{2,i}$

Table 27: General criteria for the damage intensity factor $K_{2,i}$

Stopnja	Opis	$K_{2,i}$
A	Majhna intenziteta – začetni stadij poškodb, ne zmanjšuje nosilnosti in trajnosti elementa	0.5
B	Srednja intenziteta – progresivni stadij poškodb, lahko povzroči zmanjšanje nosilnosti in trajnosti elementa	1
C	Močna intenziteta – aktivni stadij poškodb, nosilnost in trajnost elementa je ogrožena	1.5
D	Zelo močna intenziteta – kritičen stadij poškodb, nosilnost in trajnost elementa je problematična	2

5.5.2.3.4 Faktor razširjenosti poškodbe $K_{3,i}$

S tem faktorjem zajamemo površinsko razširjenost poškodbe ali pa pogostost ponavljanja poškodbe glede na obravnavano območje objekta. Razpon vrednosti privzamemo po osnovni metodologiji (Žnidarič, Peruš, 1998), kjer vrednosti znašajo od 0.5 do 2. Splošni kriteriji za določitev stopnje razširjenosti poškodbe so podani v preglednici 28.

Preglednica 28: Splošni kriteriji za faktor obsega poškodb $K_{3,i}$

Table 28: General criteria for the damage extent factor $K_{3,i}$

Stopnja	Opis	$K_{3,i}$
A	Majhen obseg, poškodba je omejena na posamezen element, obseg do 10 % površine	0.5
B	Srednji obseg, poškodba se pojavlja v manjšem obsegu na več elementih, obseg 10–25 % površine	1
C	Velik obseg, poškodba se pojavlja v večjem obsegu na več elementih, obseg 25–50 % površine	1.5
D	Zelo velik obseg, poškodba se pojavlja v večjem obsegu na večini elementov, obseg več kot 50 % površine	2

5.5.2.3.5 Faktor nujnosti intervencije $K_{4,i}$

S tem faktorjem poudarimo nujnost intervencije glede na neposredno ogrožanje varnosti in trajnosti objekta. Razpon vrednosti podan v osnovni metodologiji (Žnidarič, Peruš, 1998), kjer vrednosti znašajo od 1 do 5, nekoliko povečamo, tako da razpon znaša od 1 do 10. S tem želimo povečati vpliv zelo kritičnih poškodb na rating objekta. Splošni kriteriji za določitev faktorja nujnosti intervencije so podani v preglednici 29.

Preglednica 29: Splošni kriteriji za faktor nujnosti intervencije $K_{4,i}$

Table 29: General criteria for the urgency of intervention factor $K_{4,i}$

Stopnja	Opis	$K_{4,i}$
A	Sanacija ni nujna, poškodba ne zmanjšuje varnosti in trajnosti celotnega objekta ali obravnavanega elementa	1
B	Sanirati čim prej, da se prepreči nadaljnji razvoj poškodb in zmanjševanje varnosti in/ali trajnosti celotnega objekta ali obravnavanega elementa	2
C	Sanirati takoj, poškodbe ogrožajo varnost in/ali trajnost objekta ali obravnavanega elementa,	4
D	Neposredna nevarnost porušitve objekta ali dela objekta	10

5.5.2.3.6 Razredi poškodovanosti

Glede na dosežene ratinge je mogoče objekte razvrščati v razrede poškodovanosti. Kot pri osnovni metodi tudi tu definiramo šest razredov poškodovanosti ter za vsak razred podamo opis poškodb in opis potrebnih ukrepov (preglednica 30). Mejne vrednosti ratingov R določimo tako, da za vsak obravnavani objekt ocenimo razred poškodovanosti (skladno z opisom v preglednici) glede na dejansko prisotne poškodbe, kar nato primerjamo z izračunanimi ratingi objektov (slika 72).

Preglednica 30: Razredi poškodovanosti

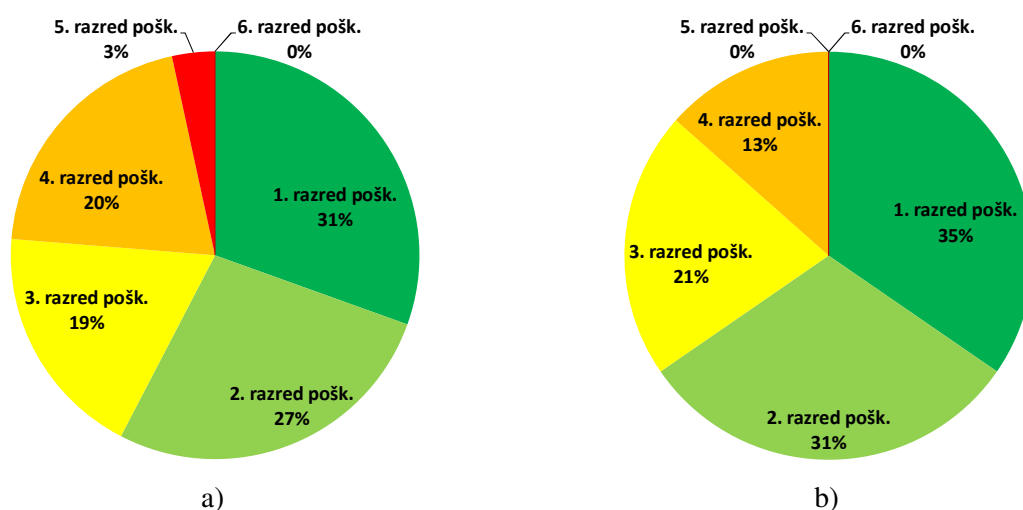
Table 30: Damage classes

Razred poškodovanosti	Opis poškodb	Vrednosti R
1	Minimalna poškodovanost , lokalne poškodbe majhne intenzitete, poškodbe ne vplivajo na varnost in trajnost objekta, ukrepi niso potrebni	0–3
2	Majhna poškodovanost , poškodbe majhnega do srednjega obsega in intenzitete, poškodbe ne vplivajo na varnost in trajnost objekta, sanacija ni potrebna, morda so potrebna manjša vzdrževalna dela	3–6
3	Srednja poškodovanost , poškodbe srednjega obsega in intenzitete, poškodbe lahko vplivajo na varnost in trajnost objekta, morda je potrebna lokalna sanacija ali obsežnejša vzdrževalna dela	6–12
4	Močna poškodovanost , poškodbe srednjega do velikega obsega, srednje do močne intenzitete, varnost in trajnost objekta je ogrožena, potrebna je celovita sanacija, omejitev uporabe ni potrebna	12–25
5	Zelo močna poškodovanost , močne poškodbe po obsegu in intenziteti, varnost in trajnost objekta je močno ogrožena, potrebna je omejitev uporabe	25–50
6	Kritična poškodovanost , prisotne so zelo močne poškodbe, objekt je nevaren za uporabo, potrebna je prepoved uporabe in podpiranje konstrukcije	> 50

5.5.3 Analiza in rezultati

Predlagano metodo smo preverili na 59 sakralnih objektih iz baze obravnavanih objektov. Rating objektov R smo izračunali z enačbo (66) ob upoštevanju (67) ter predlaganih vrednosti in kriterijev za faktorje poškodb (preglednice 25–29). Za posamezne objekte ločeno izračunamo ratinge za sklop nosilne konstrukcije (R_{NK}) in sklop zaščitne konstrukcije (R_{ZK}) ter skupni rating (R), ki izraža vsoto ratingov obeh sklopov. Rezultati so prikazani tabelarično (preglednica 31) in grafično (slika 72).

Podobno kot pri makroseizmični metodi, obravnavani v prejšnjem poglavju, tudi tu ugotavljamo, da najvišje ratinge poškodovanosti dosegajo cerkve iz zgornjega Posočja, poškodovane ob nedavnih potresih (obravnavamo jih v nesaniiranem stanju). Glede na stanje nosilne konstrukcije sta najbolj poškodovani cerkvi: Čezsoča - Cerkev sv. Antona Puščavnika ($R = 40.63$) in Bovec - Cerkev sv. Urha ($R = 33.56$), ki se uvrščata v 5. razred poškodovanosti. Po potresu sta bili ti cerkvi zaprti za uporabo. Sledijo cerkve 4. razreda poškodovanosti (12 objektov), ki so potrebne celovite sanacije: Tolmin - Cerkev sv. Urha, Drežnica - Cerkev sv. Srca Jezusovega, Kobarid - Cerkev sv. Antona Padovanskega, Mengore - Cerkev Imena Marijinega, Ljubljana - Cerkev sv. Florijana, Maribor - Cerkev sv. Alojzija, Log pri Vipavi - Cerkev Matere božje Tolažnice žalostnih, Nova Štifta - Cerkev Marijinega vnebovzvetja, Ljubljana - Cerkev sv. Petra, Selo na Goričkem - Cerkev sv. Nikolaja, Predenca - Cerkev sv. Roka, Kanalski Lom - Cerkev sv. Primoža in Felicijana. Vidimo, da so v tej skupini tudi cerkve, ki niso bile poškodovane med nedavnimi potresi. Tu so poškodbe lahko posledica diferenčnih posedkov temeljnih tal, prekomernega vlaženja s terena ali zamakanja strehe in neustreznega odvodnjavanja meteorne vode. V 3. razred poškodovanosti se uvrščajo cerkve z manjšim obsegom poškodb, ki zahtevajo lokalne sanacijske ukrepe ali vzdrževalna dela. Izmed obravnavanih je takšnih 11 objektov. Večina obravnavanih objektov pa se uvršča v 1. ali 2. razred poškodovanosti (34 objektov).



Slika 71: Deleži posameznih razredov poškodovanosti: a) za vse obravnavane cerkve, b) brez cerkev poškodovanih v nedavnih potresih

Figure 71: Distribution of damage classes: a) for all the analysed churches, b) without churches damaged in recent earthquakes

Dodatna vrednost predlagane metode je, da je mogoče ratinge poškodovanosti obravnavati po posameznih sklopih, podsklopih ali območjih ter ugotavljati njihov vpliv na skupni rating. Tako je z analizo posameznih ratingov mogoče npr. ugotoviti, ali so poškodbe prisotne predvsem na nosilni konstrukciji ali predvsem na zaščitni konstrukciji, ali so prisotne na zidovih ali stropih ipd. Takšna analiza omogoča lažje načrtovanje potrebnih sanacijskih ukrepov.

Glede stanja zaščitne konstrukcije največje vrednosti poškodovanosti dosegajo: Mengore - Cerkev Imena Marijinega ($R_{ZK} = 4.85$), Drežnica - Cerkev sv. Srca Jezusovega ($R_{ZK} = 3.65$), Visoko pod Kureščkom - Cerkev sv. Nikolaja ($R_{ZK} = 2.8$), Ljubljana - Cerkev sv. Petra ($R_{ZK} = 2.8$). Pri teh cerkvah so elementi zaščitne konstrukcije (kritina, žlebovi, odtočne cevi ...) dotrajani ali poškodovani, kar povzroča poškodbe na nosilni konstrukciji.

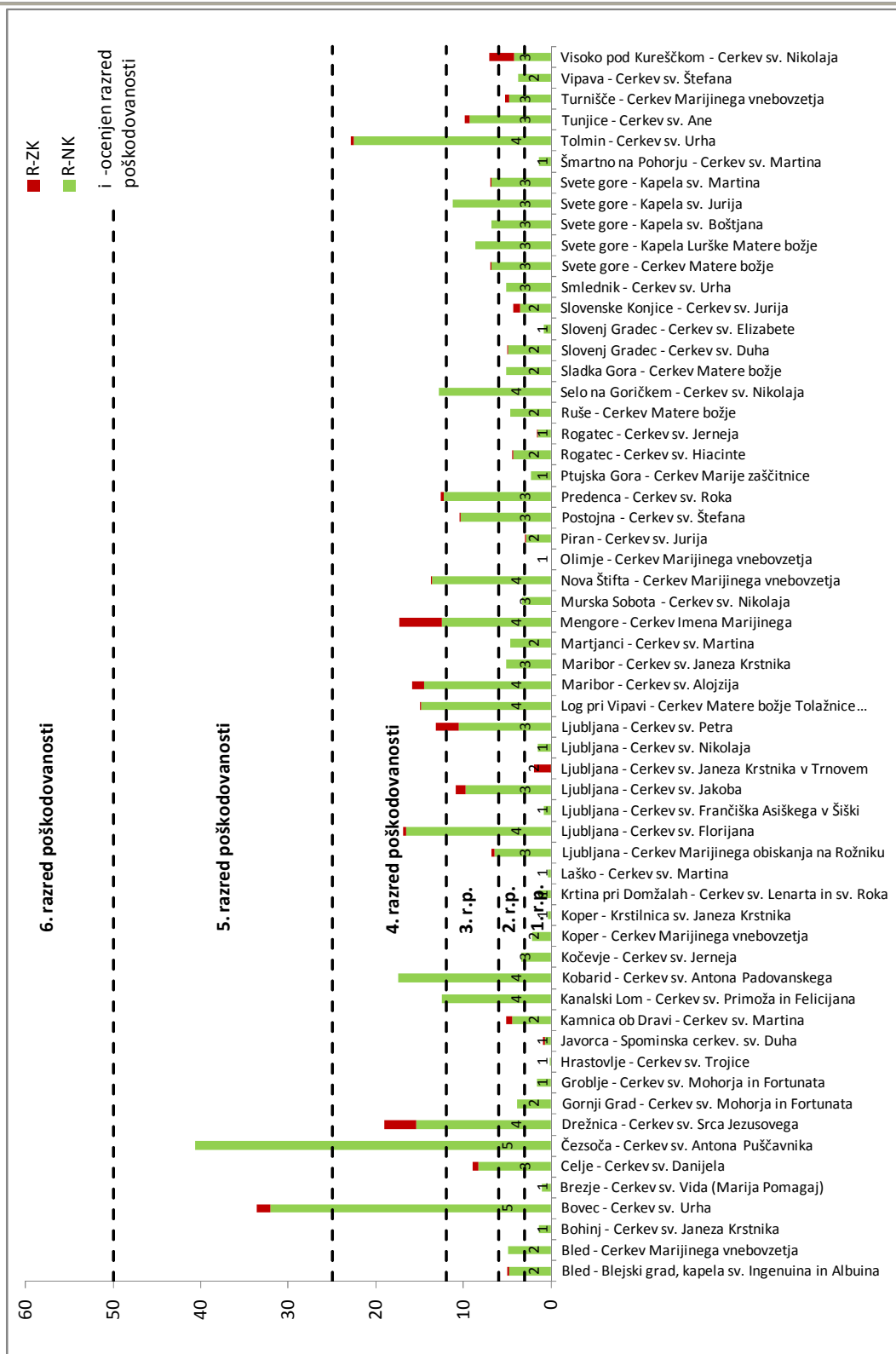
Preglednica 31: Ratingi R za obravnavane objekteTable 31: Ratings R for analysed structures

Št.	Ime enote	R_{NK}	R_{ZK}	R	Razred poškodovanosti (ocena)	Razred poškodovanosti (R)
1	Bled - Blejski grad, kapela sv. Ingenuina in Albuina	4.79	0.18	4.97	2	2
2	Bled - Cerkev Marijinega vnebovzetja	4.95	0.00	4.95	2	2
3	Bohinj - Cerkev sv. Janeza Krstnika	1.45	0.00	1.45	1	1
4	Bovec - Cerkev sv. Urha	32.06	1.50	33.56	5	5
5	Brezje - Cerkev sv. Vida (Marija Pomagaj)	1.02	0.00	1.02	1	1
7	Celje - Cerkev sv. Danijela	8.32	0.70	9.02	3	3
9	Čezsoča - Cerkev sv. Antona Puščavnika	40.63	0.00	40.63	5	5
10	Drežnica - Cerkev sv. Srca Jezusovega	15.43	3.65	19.08	4	4
11	Gornji Grad - Cerkev sv. Mohorja in Fortunata	3.91	0.00	3.91	2	2
12	Groblje - Cerkev sv. Mohorja in Fortunata	1.67	0.00	1.67	1	1
13	Hrastovlje - Cerkev sv. Trojice	0.13	0.00	0.13	1	1
14	Javorca - Spominska cerkev. sv. Duha	0.72	0.20	0.92	1	1
15	Kamnica ob Dravi - Cerkev sv. Martina	4.50	0.60	5.10	2	2
16	Kanalski Lom - Cerkev sv. Primoža in Felicijana	12.50	0.00	12.50	4	4
17	Kobarid - Cerkev sv. Antona Padovanskega	17.41	0.00	17.41	4	4
18	Kočevje - Cerkev sv. Jerneja	3.44	0.00	3.44	3	2
20	Koper - Cerkev Marijinega vnebovzetja	2.17	0.00	2.17	2	1
21	Koper - Krstilnica sv. Janeza Krstnika	0.38	0.00	0.38	1	1
22	Krtina pri Domžalah - Cerkev sv. Lenarta in sv. Roka	1.40	0.00	1.40	1	1
23	Laško - Cerkev sv. Martina	0.36	0.00	0.36	1	1
24	Ljubljana - Cerkev Marijinega obiskanja na Rožniku	6.48	0.30	6.78	3	3
25	Ljubljana - Cerkev sv. Florijana	16.56	0.30	16.86	4	4
26	Ljubljana - Cerkev sv. Frančiška Asiškega v Šiški	0.87	0.00	0.87	1	1
27	Ljubljana - Cerkev sv. Jakoba	9.75	1.20	10.95	3	3
28	Ljubljana - Cerkev sv. Janeza Krstnika v Trnovem	0.10	1.90	2.00	2	1
29	Ljubljana - Cerkev sv. Nikolaja	1.51	0.00	1.51	1	1
30	Ljubljana - Cerkev sv. Petra	10.54	2.60	13.14	3	4
31	Log pri Vipavi - Cerkev Matere božje Tolažnice žalostnih	14.85	0.03	14.88	4	4
32	Maribor - Cerkev sv. Alojzija	14.47	1.40	15.87	4	4

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 31

Št.	Ime enote	R_{NK}	R_{ZK}	R	Razred poškodovanosti (ocena)	Razred poškodovanosti (R)
33	Maribor - Cerkev sv. Janeza Krstnika	5.17	0.00	5.17	3	2
34	Martjanci - Cerkev sv. Martina	4.73	0.00	4.73	2	2
35	Mengore - Cerkev Imena Marijinega	12.52	4.85	17.37	4	4
36	Murska Sobota - Cerkev sv. Nikolaja	3.35	0.00	3.35	3	2
37	Nova Štifta - Cerkev Marijinega vnebovzetja	13.58	0.11	13.69	4	4
38	Olimje - Cerkev Marijinega vnebovzetja	0.00	0.00	0.00	1	1
39	Piran - Cerkev sv. Jurija	2.85	0.10	2.95	2	1
40	Postojna - Cerkev sv. Štefana	10.33	0.04	10.37	3	3
41	Predenca - Cerkev sv. Roka	12.29	0.30	12.59	3	4
42	Ptujska Gora - Cerkev Marije zaščitnice	2.35	0.00	2.35	1	1
43	Rogatec - Cerkev sv. Hiacinte	4.35	0.05	4.40	2	2
44	Rogatec - Cerkev sv. Jerneja	1.55	0.03	1.57	1	1
45	Ruše - Cerkev Matere božje	4.69	0.00	4.69	2	2
46	Selo na Goričkem - Cerkev sv. Nikolaja	12.87	0.00	12.87	4	4
47	Sladka Gora - Cerkev Matere božje	5.08	0.00	5.08	2	2
48	Slovenj Gradec - Cerkev sv. Duha	4.92	0.06	4.98	2	2
49	Slovenj Gradec - Cerkev sv. Elizabete	0.85	0.00	0.85	1	1
50	Slovenske Konjice - Cerkev sv. Jurija	3.55	0.80	4.35	2	2
51	Smlednik - Cerkev sv. Urha	5.16	0.00	5.16	3	2
53	Svete gore - Cerkev Matere božje	6.82	0.12	6.95	3	3
54	Svete gore - Kapela Lurške Matere božje	8.65	0.00	8.65	3	3
55	Svete gore - Kapela sv. Boštjana	6.88	0.00	6.88	3	3
56	Svete gore - Kapela sv. Jurija	11.22	0.00	11.22	3	3
57	Svete gore - Kapela sv. Martina	6.82	0.12	6.95	3	3
59	Šmartno na Pohorju - Cerkev sv. Martina	1.42	0.00	1.42	1	1
60	Tolmin - Cerkev sv. Urha	22.60	0.30	22.90	4	4
61	Tunjice - Cerkev sv. Ane	9.36	0.56	9.92	3	3
62	Turnišče - Cerkev Marijinega vnebovzetja	4.77	0.48	5.25	3	2
63	Vipava - Cerkev sv. Štefana	3.74	0.00	3.74	2	2
64	Visoko pod Kureščkom - Cerkev sv. Nikolaja	4.22	2.80	7.01	3	3



Slika 72: Ratingi R za obravnavane objekte in razredi poškodovanosti

Figure 72: Ratings R for analysed structures and damage classes

6 SOČASNA OBRAVNAVA POTRESNE OGROŽENOSTI IN STANJA SAKRALNIH STAVB

Do sedaj smo ločeno obravnavali potresno ogroženost in stanje objektov, v splošnem pa je potresna ranljivost in s tem tudi ogroženost objektov do neke mere povezana s stanjem konstrukcije. Že poškodovani objekti so gotovo bolj dovzetni za nove poškodbe pri potresu, vendar pa večina obravnavanih metod za ocenjevanje potresne ogroženosti tega vpliva ne zajema. Izjema je metoda RISK-UE na 1. nivoju, ki pri enem od parametrov upošteva tudi stanje vzdrževanja objekta (preglednica 14). Tu bi kot kriterij za stopnjo vzdrževanja lahko upoštevali stopnjo poškodovanosti oziroma rating nosilne konstrukcije R_{NK} , določenega v sklopu ocenjevanja stanja objekta. Predlagamo sledeč kriterij:

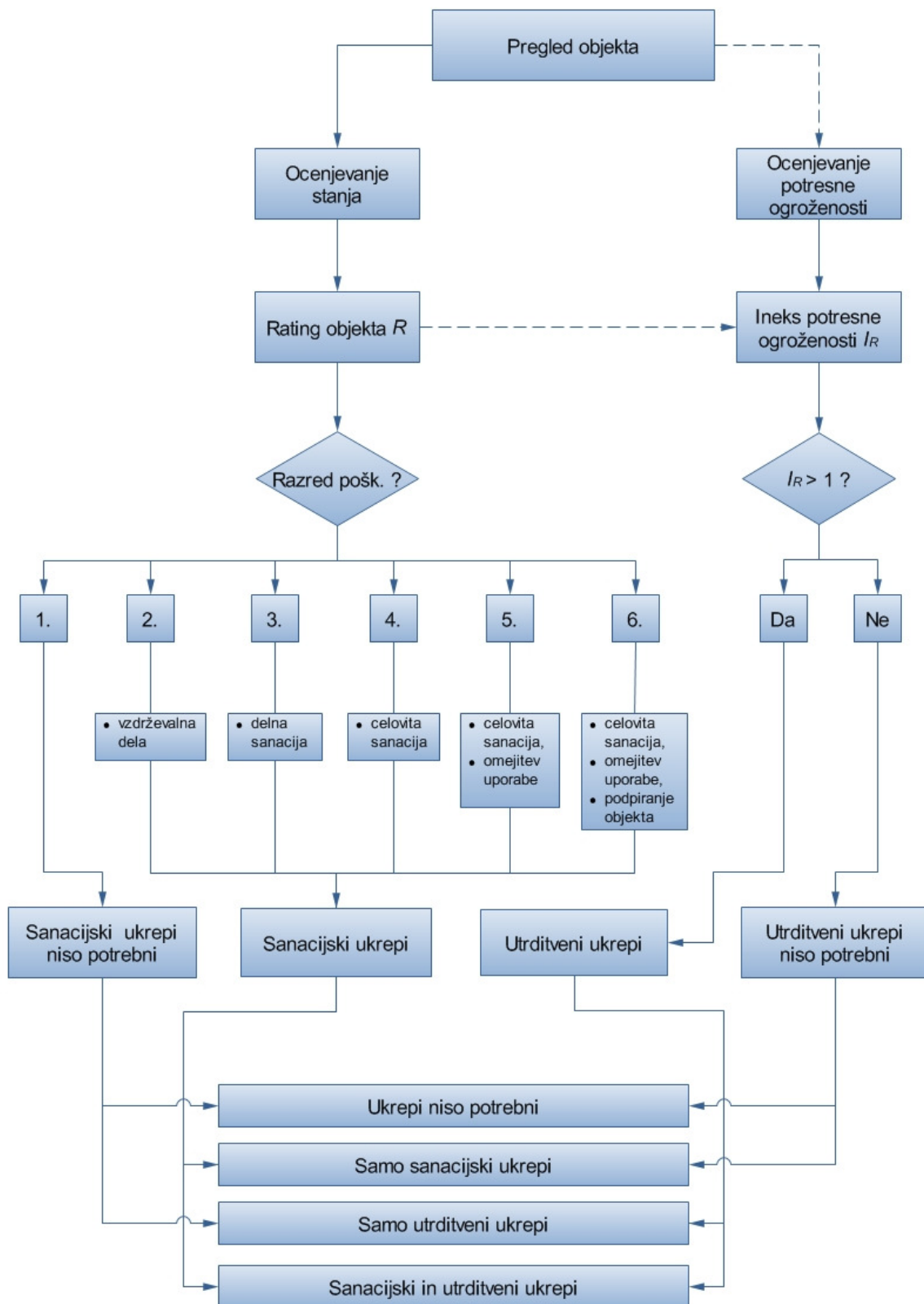
Preglednica 32: Modifikatorji V_k v odvisnosti od ratinga objekta R

Table 32: Modification factors V_k depending on condition rating factors R

	Splošni modifikatorji V_k za kulturnozgodovinske objekte (RISK-UE, 1. nivo)		
Vzdrževanje objekta	$R_{NK} \geq 25$	zelo slabo	$V_k = 0.08$
	$R_{NK} = 12-25$	slabo	$V_k = 0.04$
	$R_{NK} = 3-12$	srednje	$V_k = 0$
	$R_{NK} = 0-3$	dobro	$V_k = -0.04$

Pri metodah s poenostavljenimi indeksi za cerkve bi vpliv poškodovanosti na potresno ogroženost lahko upoštevali z ustreznim redukcijskim faktorjem nosilnih zidov ali zmanjšanjem mehanskih karakteristik zidovja pri metodi z indeksom γ_3 , kar pa je brez obsežnih računskih in eksperimentalnih analiz težko korektno ovrednotiti.

Glede načrtovanja ustreznih sanacijskih in utrditvenih ukrepov lahko povzamemo sledeče. Indeks potresne ogroženosti objekta nam podaja informacijo o tem, ali je objekt potresno ogrožen oziroma so potrebni ukrepi za izboljšanje potresne varnosti – utrditveni ukrepi. Na drugi strani nam indeks poškodovanosti (rating objekta) pove, v kakšnem stanju je objekt oziroma kakšen je potreben nivo ali obseg sanacijskih ukrepov. Ob sočasnem obravnavanju obeh vidikov (potresne ogroženosti in stanja objekta) tako lahko sklepamo na nivo in obseg potrebnih ukrepov. Poudariti je potrebno, da gre seveda za prvo, grobo oceno, ki se v nadaljevanju preveri z natančnejšimi postopki. Postopek hkratne obravnave potresne ogroženosti in stanja objektov za ocenjevanje potrebnih ukrepov je prikazan na sliki 73. Izpostaviti želimo predvsem primere, kjer je potrebna tako sanacija kot protipotresna utrditev objekta. Pri sanaciji objektov poškodovanih zaradi potresa je kontrola potresne ogroženosti in s tem načrtovanje utrditvenih ukrepov običajna praksa, manj pa je morda to samoumevno pri sanaciji objektov, kjer poškodbe niso posledica potresa. Poudariti želimo, da je v teh primerih, ko je potrebna obsežnejša sanacija poškodb, smiselno hkrati izvesti tudi potrebne utrditvene ukrepe za izboljšanje potresne odpornosti.



Slika 73: Shema za ocenjevanje potrebnih ukrepov
 Figure 73: Scheme for estimation of required measures

7 ZAKLJUČKI

V magistrskem delu smo obravnavali slovenske sakralne objekte z vidika potresne ogroženosti in poškodovanosti. Obravnavali smo 64 sakralnih stavb različni dimenzij in tlorisnih zasnov, ki pripadajo različnim umetnostnim slogom. Z različnimi enostavnimi računskimi metodami smo ocenili potresno ogroženost objektov in stanje oziroma poškodovanost objektov.

Za ocenjevanje potresne ogroženosti smo obravnavali tri enostavne metode: metodo s poenostavljenimi indeksi za cerkve, metodo RISK-UE na 1. nivoju in metodo RISK-UE na 2. nivoju. Ugotovili smo, da so za hitro ocenjevanje in razvrščanje objektov po potresni ogroženosti primerne vse tri obravnavane metode, pri čemer ima vsaka svoje prednosti in slabosti. Prednosti metode s poenostavljenimi indeksi za cerkve (indeksi γ_1 , γ_2 in γ_3) so predvsem enostavnost izračuna in objektivnost metode, glavne slabosti pa so, da je potreben posnetek objekta ter da ne zajemajo pojava izvenravninskih mehanizmov. Izmed treh indeksov je za uporabo še najbolj primeren indeks γ_3 , ki za razliko od drugih dveh zajema tudi vpliv materialnih karakteristik zidov. Prednost metode RISK-UE na 1. nivoju je predvsem enostavnost izračuna in možnost zajema nekaterih posebnosti sakralnih objektov. Pri metodi RISK-UE na 2. nivoju kot glavno prednost izpostavljamo dejstvo, da zajema tudi izvenravninske mehanizme, kot glavno slabost pa predvsem subjektivnost metode.

Analiza obravnavanih objektov je pokazala, da so rezultati vseh treh metod (indeks γ_3 , RISK-UE, 1. nivo in RISK-UE, 2. nivo) do neke mere med seboj primerljivi (če pri indeksu γ_3 upoštevamo nekoliko večji faktor obnašanja konstrukcije ($q = 2.25$) od prvotno predpostavljenega ($q = 1.5$)). Pomenljiva je ugotovitev, da lahko konceptualno povsem različne metode dajejo zelo podobne ocene potresne ogroženosti. Zelo dobro ujemanje rezultatov pokaže primerjava metode z indeksom γ_3 ($q = 2.25$) in metode RISK-UE na 2. nivoju. Pri tem je prva poenostavljena računska metoda, ki temelji na oceni strižne nosilnosti zidov, druga pa empirična metoda, pri kateri se ocenjuje možnost pojava različnih porušnih mehanizmov posameznih makroelementov. Najbolj pesimistične ocene potresne ogroženosti daje v splošnem metoda z indeksom γ_3 , najbolj optimistične pa metoda RISK-UE na 1. nivoju. Metoda RISK-UE na 2. nivoju ne zajema posebnosti kapel in rotund.

Da bi ugotovili, katera obravnavana metoda daje bolj realne rezultate, smo izvedli tudi analize z natančnejšimi računskimi metodami in primerjali dejanske poškodbe na objektih poškodovanih med potresi z rezultati obravnavanih metod. Natančnejše računske analize s programom SREMB, ki smo jih izvedli za 15 karakterističnih objektov, nakazujejo, da so rezultati metod RISK-UE morda preveč optimistični, vendar pa se je pri tem potrebno zavedati tudi omejitev in predpostavk programa. Vprašljiva je predvsem predpostavka o povezanosti zidov in pa dejstvo, da program ne zajema

izvenravninskih porušnih mehanizmov. Tudi analiza poškodovanosti cerkva iz zgornjega Posočja, ki so bile poškodovane v potresu l. 2004, glede verodostojnosti indeksov ne daje zanesljivih zaključkov. Glavni problem je, da ne razpolagamo s podatki o velikosti efektivnih vršnih pospeškov, s katerimi bi lahko primerjali izračunane mejne pospeške. Ob določenih predpostavkah lahko domnevamo, da so vrednosti indeksov γ_3 ob upoštevanju faktorja obnašanja $q = 1.5$ podcenjene. Pri metodi z indeksom γ_3 je tako bolj smiselno upoštevati nekoliko višji faktor obnašanja, kar kaže tudi primerjava z rezultati obravnavanih empiričnih metod (RISK-UE).

Na uvodoma zastavljeno vprašanje, ali je na osnovi elementarnih podatkov o konstrukciji, vgrajenih materialih in poškodovanosti možno podati realno oceno potresne ogroženosti objektov sakralne arhitekture, lahko na podlagi opravljenega dela odgovorimo, da je takšna ocena možna, vendar predvsem v relativnem smislu. Za bolj natančne rezultate v smislu absolutnih vrednosti so potrebne natančnejše metode.

Poleg potresne ogroženosti smo z enostavnimi računskimi metodami analizirali tudi potresno ranljivost sakralnih objektov. Prva ugotovitev je, da izračunane potresne ranljivosti obravnavanih sakralnih objektov ne kažejo izrazite odvisnosti od seizmičnosti lokacije, kar zavrača domnevo, da so stavbeniki pri zasnovi cerkva upoštevali kriterije seizmičnosti. Ugotavljali smo tudi odvisnost potresne ranljivosti od tlorisne zasnove in umetnostnega sloga objektov. Glede tlorisne zasnove lahko zaključimo, da so najbolj ranljive velike cerkve s triladijsko zasnovo, najmanj pa majhne kapele in rotunde. Glede povezave med potresno ranljivostjo objekta in pripadajočim umetnostnim slogom na podlagi izvedene analize ne moremo podati zanesljivih zaključkov.

Za ocenjevanje potresne ogroženosti zvonikov smo predlagali metodo, ki smo jo izpeljali iz metode s poenostavljenimi indeksi za cerkve. Analiza je pokazala, da je pri oceni potresne ogroženosti zvonikov potrebno preveriti tako strižni kot upogibni porušni mehanizem, saj je upogibni mehanizem prevladujoč šele pri vitkih zvonikih z razmerjem višine proti širini večjim od 3. Rezultati analize ne kažejo izrazite odvisnosti med vitkostjo in potresno ogroženostjo zvonikov.

Izdelali smo tudi metodo za ocenjevanje stanja oziroma poškodovanosti sakralnih objektov, pri čemer smo izhajali iz metode za ocenjevanje poškodovanosti mostov. Na osnovi pregleda objekta se popišejo poškodbe na konstrukcijskih in nekonstrukcijskih elementih. Poškodbe se ovrednotijo glede na obseg poškodovanosti, intenziteto poškodb in glede na nujnost intervencijskih ukrepov. Poleg tega se upošteva tudi pomembnost elementa, na katerem je prisotna poškodba, in pomembnost območja, kjer se element nahaja. Rezultat metode predstavlja rating poškodovanosti, ki odraža vsoto vseh nastopajočih poškodb. Glede na dosežen rating se objekte lahko razvrsti v razrede poškodovanosti. Predlagali smo šest razredov poškodovanosti z okvirnimi opisi stanja poškodb in potrebnih ukrepov.

Prednost metode je, da omogoča vrednotenje po različnih sklopih (npr.: primarna nosilna konstrukcija, sekundarna nosilna konstrukcija, zaščitna konstrukcija) ali po različnih območjih (npr. zvonik, glavna ladja, prezbiterij ...).

Sočasna obravnava obeh vidikov, potresne ogroženosti in stanja poškodovanosti, omogoča učinkovitejše načrtovanje potrebnih ukrepov, predvsem v primerih, ko so potrebni tako utrditveni ukrepi zaradi potresne ogroženosti objekta kot tudi sanacijski ukrepi zaradi poškodovanosti objekta.

Na podlagi izvedenih analiz je do neke mere možno sklepati tudi na potresno ogroženost in stanje poškodovanosti slovenskih sakralnih stavb na teritorialnem nivoju. Ob predpostavljani povprečni potresni odpornosti slovenskih sakralnih objektov smo ocenili število potresno ogroženih sakralnih stavb, ki so evidentirane v registru nepremične kulturne dediščine. Glede na različne uporabljene metode ocenjujemo, da je potresno ogroženih 60–80 % od 2624 kulturnozgodovinskih sakralnih objektov. Pri tem je zmerno potresno ogroženih približno 1350–1550 objektov, močno potresno ogroženih pa okoli 400 objektov. Glede stanja poškodovanosti sakralnih stavb lahko ob predpostavki, da nabor 52 analiziranih objektov (poškodovanih objektov zaradi potresov tu ne upoštevamo) predstavlja reprezentativen vzorec, ocenimo, da je okoli 21 % sakralnih objektov v Sloveniji potrebnih delne sanacije ali obsežnejših vzdrževalnih del, okoli 13 % pa je potrebnih celovite sanacije.

Opravljenе analize in rezultati predstavljajo poskus sistematične obravnave potresne ogroženosti in poškodovanosti sakralnih stavb v Sloveniji. Za nadaljnje delo na tem področju se ponuja veliko možnosti. Glede ocene potresne ogroženosti bi bilo dobro obravnavane objekte preveriti na višjem nivoju, tj. z natančnejšimi računskimi analizami, kar bi omogočilo boljši vpogled v primernost tu obravnavanih enostavnih metod. Glede ocene poškodovanosti objektov je predlagano metodo potrebno preveriti na večjem naboru raznolikih in različno poškodovanih objektov ter preveriti verodostojnost predlaganih faktorjev in predlaganih mejnih vrednosti posameznih razredov poškodovanosti. Metodo bi bilo mogoče razširiti tudi tako, da bi vključevala ocenjevanje stanja umetniških elementov.

8 POVZETEK

V magistrskem delu obravnavamo problematiko potresne ogroženosti in poškodovanosti slovenskih sakralnih objektov. Obravnavan je začetni korak sistematičnega pristopa k varovanju sakralnih objektov, v sklopu katerega se s hitrimi in enostavnimi metodami identificira potresno najbolj ogrožene oziroma poškodovane objekte.

Pregled strokovne literature je pokazal, da so v svetu že razvite številne metode za ocenjevanje potresne ogroženosti in poškodovanosti objektov, med njimi tudi nekaj takih, ki obravnavajo sakralne objekte. Pregledu literature sledi izbor najprimernejših metod za potrebe naloge. Za ocenjevanje potresne ogroženosti izberemo tri enostavne metode: metodo s poenostavljenimi indeksi za cerkve, metodo RISK-UE na 1. nivoju in metodo RISK-UE na 2. nivoju. Izbrane metode uporabimo na 64 slovenskih sakralnih objektih, pri čemer nekatere metode nekoliko modificiramo. Rezultat metod predstavlja indeks potresne odpornosti in indeks potresne ogroženosti. Rezultate metod primerjamo med sabo ter v nekaj primerih tudi z rezultati analiz natančnejših računskih metod. Ugotovimo, da so za potrebe naloge v splošnem primerne vse obravnavane metode, pri čemer pa ima vsaka svoje prednosti in slabosti. V sklopu naloge ugotavljamo tudi morebitno povezavo med ranljivostjo objektov in seizmičnostjo lokacije ter vpliv tlorisne zasnove in umetnostnega sloga na ranljivost objektov. Ugotovimo, da pri obravnavanih objektih ni zaznati izrazite odvisnosti potresne ranljivosti od seizmičnosti lokacije. Glede vpliva tlorisne zasnove ugotovimo, da so v splošnem najbolj ranljive velike cerkve s triladijsko zasnovo, najmanj pa majhne kapele in rotunde. Glede povezave med potresno ranljivostjo objekta in pripadajočim umetnostnim slogom na podlagi izvedenih analiz ne moremo podati zanesljivih zaključkov. Zvoniki zaradi bistveno drugačne geometrije zahtevajo posebno obravnavo. Uporabimo metodo s poenostavljenimi indeksi za cerkve, ki jo prilagodimo za potrebe zvonikov.

Za ocenjevanje stanja oziroma poškodovanosti objektov preverimo dve metodi: metodo RISK-UE na 2. nivoju, ki je namenjena predvsem ocenjevanju poškodovanosti po potresih, in metodo ratingov objektov. Slednja je bila v osnovi razvita za ocenjevanja stanja mostov, v okviru naloge pa smo jo prilagodili za ocenjevanje sakralnih objektov. Metoda poleg stopnje poškodovanosti oziroma ratinga objekta podaja tudi oceno o potrebnih sanacijskih ukrepih. Zaključimo z ugotovitvijo, da je ob sočasni uporabi obeh vidikov, potresne ogroženosti in stanja poškodovanosti, mogoče učinkovitejše načrtovanje potrebnih ukrepov.

9 SUMMARY

In the master's thesis the problems of seismic risk and damage of the Slovenian sacral architecture are discussed. The first step of the systematic approach to the protection of the religious buildings is discussed, in the framework of which buildings that are seismically most at risk or most damaged can be identified with quick and simple methods.

The overview of the scientific literature showed that throughout the world numerous methods for seismic risk and damage assessment of the buildings have been developed, among them are also methods that have religious character as their function. Overview of the literature is followed by the selection of the most suitable methods for the purposes of this thesis. To assess seismic risk three simple methods are chosen: methods with simplified indexes for churches, RISK-UE method on the 1st level and RISK-UE method on the 2nd level. Chosen methods are used on 64 Slovenian sacral buildings, with some methods being slightly modified. The result of the methods is represented by seismic resistance index and seismic risk index. The results of the methods are compared, in some cases also with results of the analyses of more precise calculating methods. It is established that, in general, all discussed methods are suitable for the purposes of the thesis, each having its advantages and disadvantages. The possible correlation between the building's vulnerability and seismicity of the location as well as the influence of the ground floor plan and architectural style on the building's vulnerability is determined within the framework of this thesis. It is established that for the discussed buildings no distinctive dependence of the seismic vulnerability from the seismicity of the location is detected. Concerning the influence of the ground floor plan it is determined that, in general, big churches with three aisle floor plan are most vulnerable and small chapels and rotundas the least. No reliable conclusions regarding the correlation between the seismic vulnerability of the building and appurtenant architectural style can be made on the basis of the performed analyses. Church towers demand special treatment due to essentially different geometry. The method of simplified indexes for the churches is used, but adapted for the purposes of the church towers.

To assess the damage of the buildings two methods are examined: RISK-UE method on the 2nd level, which is above all intended to assess the damage after the earthquakes, and the condition rating method. The latter was initially developed for the assessment of the condition of the bridges; however, it was adapted in this thesis for assessing the buildings of sacral architecture. Method provides, in addition to the degree of damage of the building, also the assessment of the necessary rehabilitation measures. The conclusion is that by simultaneously using both aspects, seismic risk and damage, it is possible to plan necessary measures in a more effective way.

VIRI

Uporabljeni viri

- Augusti, G., Ciampoli, M., Giovenale, P. 2001. Seismic vulnerability of monumental buildings. *Structural Safety* 23, 3: 253–274.
- Bosiljkov, V., Page, A., W., Simundic, G., Žarnić, R. 2010. Shear Capacity of the Flange-Web Intersections of Brick Masonry Nonrectangular Sections. *Journal of Structural Engineering* 136, 5: 574–585.
- Bosiljkov, V., Žarnić, R., Bokan-Bosiljkov, V., Čepon, F. 2008. Prvo fazno poročilo UL FGG za leto 2007. Izdelava in demonstracija modela za načrtovanje ohranjanja umetnostnozgodovinske dediščine v vojnih spopadih. Ljubljana, ARRS: 55 str.
- Bosiljkov, V., Gostič, S. 2009. Končno poročilo za CRP Mir M4-0207. Izdelava in demonstracija modela za načrtovanje ohranjanja umetnostnozgodovinske dediščine v vojnih spopadih. Ljubljana, ARRS: 69 str.
- Bosiljkov, V., Kržan, M. 2012. Deliverable D15: Results of laboratory and in-situ tests on masonry properties and tables with mechanical parameters to be adopted in numerical modelling. European research project PERPETUATE, proposal no. 244229. European Commission, FP7: 225 str.
- Calvi, M. (ur.), Cecchi, R. (ur.). 2007. Guidelines for evaluation and mitigation of seismic risk to cultural heritage with reference to technical construction regulations. Rome, Gangemi Editore: 80 str.
- Calvi, G. M., Pinho, R., Magenes, G., Bommer, J. J., Restrepo-Vélez, L. F., Crowley, H. 2006. Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years. *ISET Journal of Earthquake Technology* 43, 3: 75–104.
- Cherubini, A., Di Pasquale, G., Dolce, M., Martinelli, A. 2000. Vulnerability assessment from quick survey data in the historic centre of Catania. V: Faccioli, E. (ur.), Pessina, V. (ur.). *The Catania Project: earthquake damage scenarios for high risk area in the Mediterranean*. Roma, CNR-GNDT: str. 213–225.
- Coronelli, D. 2007. Condition rating of RC structures: A case study. *Journal of Building Appraisal* 3, 1: 29–51.
- Curti, E., Parodi, S., Podestá, S. 2008. Simplified models for seismic vulnerability analysis of bell towers. V: D'Ayala, D. (ur.), Fodde, E. (ur.). *Structural Analysis of Historic Construction*. London, Taylor & Francis Group: str. 1237–1244.
- D'Ayala, D., Speranza, E. 2003. Definition of collapse mechanisms and seismic vulnerability of historic masonry buildings. *Earthquake Spectra* 19, 3: 479–509.

D'Ayala, D. et al. 2010. Deliverable D8: Review and validation of existing vulnerability displacement-based models. European research project PERPETUATE, proposal no. 244229. European Commission, FP7: 53 str.

Fajfar, P. 2000. A Nonlinear Analysis Method for Performance Based Seismic Design. *Earthquake Spectra* 16, 3: 573–592.

Fajfar, P., Fischinger, M., Peruš, I., Dolšek, M., Kante, P. 2002. Pregled metod za ocenjevanje potresnega tveganja. Razvojno-raziskovalna naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, IKPIR.

Favaretto, T. 2012. Assessment and Reduction of Seismic Vulnerability of Art Objects. PhD Thesis. Braunschweig, Civil Engineering and Environmental Sciences University of Braunschweig – Institute of Technology, Department of Architecture, Florence, University of Florence, Faculty of Engineering: 251 str.

FEMA-155: 1998. Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: Supporting documentation. Washington, D. C., FEMA: 139 str.

FEMA-154: 2002. Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook. Edition 2. Washington, D. C., FEMA: 140 str.

Gostič, S. 2008. Vmesno poročilo za CRP Mir M4-0207: Izdelava in demonstracija modela za načrtovanje ohranjanja umetnostnozgodovinske dediščine v vojnih spopadih. Zasnova baze podatkov. Ljubljana, ARRS: 44 str.

Grünthal, G. (ur.). 1998. European Macroseismic Scale 1998. Luxembourg, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie: 101 str.

HAZUS-MH MR1. Advanced Engineering Building Module. Technical And User's Manual. 2003. Washington, D. C., FEMA: 119 str.

Irizarry, J., Goula, X., Susagna, T., Roca, A., Maña, F. 2004. Earthquake risk scenarios for monuments in Barcelona, Spain. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B. C., Canada, August 1–6, 2004: 11 str.

Lagomarsino, S. 1998. A new methodology for the post-earthquake investigation of ancient churches. 11th European Conference on Earthquake Engineering, Rotterdam, Balkema: 12 str.

Lagomarsino, S. 1999. Damage survey of ancient churches: the Umbria-Marche experience. V: Bernardini A. (ur.). Seismic damage to masonry buildings. Rotterdam, Balkema: 14 str.

Lagomarsino, S., Podesta, S., Cifani, G., Lemme, A. 2004a. The 31st October 2002 Earthquake in Molise (Italy): A New Methodology for the Damage and Seismic Vulnerability Survey of Churches. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B. C., Canada, August 1–6, 2004: 11

str.

Lagomarsino, S., Podesta, S., Resemini, S. 2004b. Observational and mechanical models for the vulnerability assessment of monumental buildings. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B. C., Canada, August 1–6, 2004: 15 str.

Lagomarsino, S., Giovanazzi, S. 2006. Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering* 4, 4: 415–443.

Lagomarsino, S. 2006. On the vulnerability assessment of monumental buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering* 4, 4: 445–463.

Lang, K. 2002. Seismic vulnerability of existing buildings. PhD Thesis. Zurich, Swiss federal institute of technology Zurich: 190 str.

Lapajne, J. 2005. Potres 12. julija 2004 v zgornjem Posočju in karta potresne nevarnosti. *Ujma* 19: 74–81.

Lourenço, P. B., Roque J. A. 2005. Simplified indexes for the seismic vulnerability of ancient masonry buildings. *Construction and Building Materials* 20, 4: 200–208.

Lourenço, P. B., Oliveira D. V. 2005. Seismic Vulnerability Overview of Historical Churches in Europe. V: Chidiac, S. E. (ur.). *Transferring research into practice: proceedings of the Canadian Conference on Effective Design of Structures*. Hamilton, Canada, Hamilton McMaster University: str. 453–462.

Nakano, Y., Maeda, M., Kuramoto, H., Murakami, M. 2004. Guideline for post-earthquake damage evaluation and rehabilitation of RC buildings in Japan. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B. C., Canada, August 1–6, 2004: 15 str.

Naglič, A. 2011. Seizmična analiza sakralnih objektov. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, KPMK: 146 str.

OPCM 3274: 2003. Testo integrato dell'Allegato 2 – Edifici – all'Ordinanza 3274 come modificato dall'OPCM 3431 del 3/5/05.

Otani, S. 2000. Seismic Vulnerability Assessment of Reinforced Concrete Buildings. *Journal* 47, B, Tokyo, University of Tokyo, Faculty of Engineering: 5–28.

Pravilnik o mehanski odpornosti in stabilnosti objektov. Uradni list RS 101/2005: str. 10637–10639.

Register nepremične kulturne dediščine.

<http://giskd2s.situla.org/rkd/Seznam.asp?MenuGeslo=cerkev&MenuVd=nepremi%E8na+kulturna+dedi%9A%E8ina&MenuTe=sakralna+stavbna+dedi%9A%E8ina&MenuZa=%25&MenuOb=%25&MenuVS=%25&MenuFlag=1&Poisci2=Iskanje> (Pridobljeno 11. 1. 2012).

Seznam cerkva v Sloveniji.

http://sl.wikipedia.org/wiki/Seznam_cerkva_v_Sloveniji (Pridobljeno 11. 1. 2012).

SIST EN 1990:2004. Evrokod: Osnove projektiranja konstrukcij.

SIST EN 1991-1-4:2005. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-4. del: Splošni vplivi – Obtežbe vetra.

SIST EN 1996-1-1:2006. Evrokod 6: Projektiranje zidanih konstrukcij – 1. del: Splošna pravila za armirano in nearmirano zidovje.

SIST EN 1998-1:2005. Evrokod 8: Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij – 1. del: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe.

SIST EN 1998-1:2005/A101:2009. Evrokod 8: Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij – 1. del: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe – Nacionalni dodatek.

SIST EN 1998-3:2005. Evrokod 8: Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij – 3. del: Ocena in prenova stavb.

Štampfl, A. 2003. Primerjalna analiza potresne odpornosti stavbe Veterinarske fakultete v Ljubljani s programi SREMB in SAP2000. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, KPMK: 107 str.

Tomaževič, M. 1987. Zidane zgradbe na potresnih območjih. Ljubljana, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo.

Tomaževič, M. 2008. Strižna odpornost zidov in Evrokod 6: Natezna ali strižna trdnost zidovja. Gradbeni vestnik 57, 5:113–128.

Tomaževič, M. 2009. Potresno odporne zidane stavbe. Ljubljana, Tehnis: 301 str.

Zakon o spremembah in dopolnitvah zakona o graditvi objektov (ZGO-1B). Uradni list RS 126/2007: str. 18714–18729.

Žnidarič, J., Žnidarič, A. 1994. Evaluation of the carrying capacity of existing bridges. Final Report. Ljubljana, ZRMK: 122 str.

Žnidarič, J., Peruš, I. 1998. Condition rating methods for concrete structures. V: Bulletin d'Information 243. Strategies for testing and assessment of concrete structures. Lausanne, Switzerland, Comité Euro-International du Béton: str. 155–168.

Ostali viri

Architectural terminology.

http://img.uoregon.edu/arh314/terminology/Terminology_all.html (Pridobljeno 6. 9. 2013).

- Balažic, J. et al. 1995. Gotika v Sloveniji. Ljubljana, Narodna galerija v Ljubljani: 435 str.
- Baudurina, A., Škunca, B., Škunca, F. 1987. Sakralni prostor tijekom povijesti i danas. Zagreb, Florijan Škunca: 275 str.
- Debevec, L. 1999. Prenova in gradnja bogoslužnih stavb. Ljubljana, Inštitut za sakralno arhitekturo: 154 str.
- Doglioni, F. (ur.), Moretti, A. (ur), Petrini, V. (ur.) 1994. Le chiese e il terremoto: Dalla vulnerabilità constatata nel terremoto del Friuli al miglioramento antisismico nel restauro, verso una politica di prevenzione. C.N.R. Gruppo nazionale per la difesa dai terremoti, Trieste, Edizioni Lint.
- Đurović, B., Mikoš, M. 2006. Ali smo ogroženi kadar tvegamo? Pojmi in izrazje teorije tveganj zaradi naravnih, geološko pogojenih nevarnosti. Geologija 49, 1: 151–161.
- Fister, P. 1986. Umetnost stavbarstva na Slovenskem. Ljubljana, Cankarjeva založba: 440 str.
- Komelj, I., 1973. Gotska arhitektura na Slovenskem. Ljubljana, Slovenska matica: 321 str.
- Koch, W. 1999. Umetnost stavbarstva. Ljubljana, Mladinska knjiga: 534 str.
- Lapajne, J. 2009. Nekateri tektonski, seizmotektonski in seizmološki termini – 2. del. Ujma 23: 305–313.
- Lapajne, J. 2011. Nekateri tektonski, seizmotektonski in seizmološki termini – 3. del. Ujma 25: 322–327.
- Obal, F., 2002. Arhitektura historicizma in secesije v Prekmurju. Murska Sobota, Pomurska založba: 173 str.
- Slovar slovenskega knjižnega jezika. 2005. Izdala Slovenska akademija znanosti in umetnosti in Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti, Inštitut za slovenski jezik Frana Ramovša. Ljubljana, DZS: 1714 str.
- Stele, F., 2011. Umetnost svetega. Cerkev na Slovenskem. Koper, Ognjišče d.o.o.: 464 str.
- Terminološki slovar.
<http://www.zvkds.si/sl/zvkds/varstvo-kulturne-dediscine/terminoloski-slovar/> (Pridobljeno 25. 2. 2013).
- Zadnikar, M. 1973. Spomeniki cerkvene arhitekture in umetnosti. Celje, Mohorjeva družba v Celju: 237 str.
- Zadnikar, M. 2001. Romanske cerkve v Sloveniji. Ljubljana, Družina d.o.o.: 106 str.