

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 izvorna različica zaključnega dela.

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

Prestor, J. 2005. Kalibracija standardov za dimenzioniranje gradbenih konstrukcij. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Turk, G., somentorica Srpčič, J.): 53 str.

University  
of Ljubljana  
Faculty of  
*Civil and Geodetic  
Engineering*



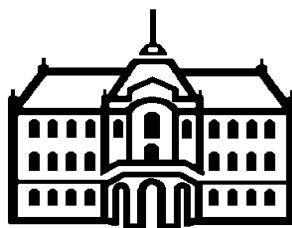
Jamova cesta 2  
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

**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:

Prestor, J. 2005. Kalibracija standardov za dimenzioniranje gradbenih konstrukcij. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering. (supervisor Turk, G., co-supervisor Srpčič, J.): 53 pp.



UNIVERZA V LJUBLJANI  
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

Kandidat:

**JURE PRESTOR**

**KALIBRACIJA STANDARDOV ZA  
DIMENZIONIRANJE GRADBENIH KONSTRUKCIJ**

Diplomska naloga št.: 195/K

**CALIBRATION OF STANDARDS FOR THE  
DIMENSIONING OF BUILDING CONSTRUCTION**

Graduation thesis No.: 195/K

**Mentor:**  
izr. prof. dr. Goran Turk

**Predsednik komisije:**  
izr. prof. dr. Roko Žarnić

**Somentorica:**  
mag. Jelena Srpčič

**Ljubljana, 2005**

**IZJAVA O AVTORSTVU:**

Podpisani **JURE PRESTOR** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:  
**»KALIBRACIJA STANDARDOV ZA DIMENZIONIRANJE GRADBENIH KONSTRUKCIJ«.**

Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela za potrebe elektronske separatoteke FGG.

Ljubljana, 26. 9. 2005

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

**UDK:** 519.21:624.011.1(043.2)

**Avtor:** Jure Prestor

**Mentor:** Izr. prof. dr. Goran Turk

**Somentorka:** Mag. Jelena Srpčič

**Naslov:** Kalibracija standardov za dimenzioniranje gradbenih konstrukcij

**Ključne besede:** zanesljivost, indeks zanesljivosti, verjetnost porušitve, varnostni faktorji, kalibracija

### **Izvodček:**

Diplomsko delo obravnava problem kalibracije oziroma umerjanja varnostnih faktorjev za dimenzioniranje lesenih gradbenih konstrukcij. V prvem delu diplomskega dela so prikazani in razloženi osnovni pojmi, na katerih temelji celoten postopek kalibracije varnostnih faktorjev. Tako so definirani pojmi zanesljivost konstrukcij, verjetnost porušitve, indeks zanesljivosti in drugi. Prikazana sta enostavna izračuna zanesljivosti konstrukcij ter osnovni primer, kjer je odziv konstrukcije poljubno porazdeljen. Opisana je metoda prvega reda drugega momenta. Prikazan je primer standarda Evrokoda 5, kjer sta razloženi enačba za dimenzioniranje lesenih konstrukcij ter funkcija mejnega stanja. Z uporabo funkcije mejnega stanja in metode prvega reda drugega momenta se določi verjetnost porušitve, ki je tem večja, čim manjši je indeks zanesljivosti. Hkrati so podani predlagani ciljni indeksi zanesljivosti po Evrokodu, ki se izbirajo glede na pomembnost obravnavane lesene konstrukcije. V nadaljevanju so opisane vse vrste kalibracij varnostnih faktorjev, njihov namen ter pogoji uporabe. V zadnjem delu je konkretno predstavljen izračun dimenzioniranja enostavne lesene konstrukcije po priporočilih Evrokoda 5. Za omenjen enostaven računski primer so z računalniškim programom CodeCal izračunani indeksi zanesljivosti za enoletno referenčno dobo. Priporočene delne varnostne faktorje po Evrokodu 5 sem za konkretni primer optimiziral na podlagi izbranega ciljnega indeksa zanesljivosti  $\beta$  in značilnega razmerje stalne in prevladujoče spremenljive obtežbe  $\alpha$ . Optimizirani delni varnostni faktorji konkretnega primera so po pričakovanju manjši, kar pa še ni razlog za spreminjanje osnovne enačbe Evrokoda 5.

## **BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

**UDC:** 519.21:624.011.1(043.2)

**Author:** Jure Prestor

**Supervisor:** prof. dr. Goran Turk

**Cosupervisor:** mag. Jelena Srpčič

**Title:** Calibration of standards for the dimensioning of building constructions

**Key words:** reliability, reliability index, collapse probability, safety factors, calibration

### **Abstract**

This thesis deals with the problem of calibration or the adjustment of safety factors for the dimensioning of wooden building constructions. The first part of the thesis presents and explains the basic concepts on which the whole procedure of safety factors' calibration is based. This includes the definitions of the following concepts: construction reliability, collapse probability, reliability index and others. Two simple calculations of construction reliability and a basic example, where the construction response is divided subjectively, are presented. There is a description of the first order method second moment. The thesis also presents an example of the Eurocode 5 Standard where the equation for the dimensioning of wooden constructions and the boundary condition function are explained. By using the boundary condition function and the first order method second moment, we can determine the collapse probability, which increases if the reliability index is decreased. At the same time the target indexes of reliability suggested by the Eurocode and chosen according to the importance of the wooden construction in question are also stated. The following section includes the descriptions of all types of safety factors' calibrations, their purpose and the conditions of use. The last section concretely presents the dimensioning calculation of a simple wooden construction as recommended by Eurocode 5. For the simple calculation example mentioned above, the indexes of reliability for a one-year reference period have been calculated with the computer programme CodeCal. The recommended partial safety factors according to Eurocode 5 have been optimised for this concrete case on the basis of the chosen target reliability index  $\beta$  and a typical ratio between permanent and prevailing variable burdening  $\alpha$ . As expected the optimised partial safety factors of this concrete case are smaller, however this does not provide sufficient grounds to change the basic equation of Eurocode 5.

### **ZAHVALA:**

Za pomoč pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju izr. prof. dr. Goranu Turku ter somentorici mag. Jeleni Srpčič. Hvala tudi vsem na katedri, ki so mi omogočili prijetno delovno vzdušje.

Zahvalil bi se tudi staršema, starima staršema ter vsem ostalim, ki so mi vsa leta študija nudili pomoč in razumevanje v stiskah ter mi tako pomagali narediti vsak še tako naporen dan lepši.

## VSEBINA

1	UVOD.....	1
2	ZANESLJIVOST KONSTRUKCIJ .....	2
2.1	Definicija .....	2
2.2	Račun zanesljivosti konstrukcij .....	4
2.3	Metoda prvega reda drugega momenta .....	13
2.4	Standardi za dimenzioniranje lesenih konstrukcij .....	18
2.4.1	Ciljna stopnja varnosti pri lesenih konstrukcijah .....	18
2.4.2	Primer standarda - Evrokod .....	20
3	KALIBRACIJA .....	23
3.1	Definicija kalibracije .....	23
3.2	Vrste kalibracij .....	23
3.2.1	Določanje varnostnih faktorjev po inženirski presoji.....	23
3.2.2	Primerna uporaba varnostnih faktorjev .....	24
3.2.3	Postopek optimizacije standardov oziroma vrednosti varnostnih faktorjev .....	24
3.3	Optimizacija standardov .....	27
4	ANALIZA RAČUNSKIH PRIMEROV Z RAČUNALNIŠKIM PROGRAMOM CodeCal .....	29
4.1	Uvod .....	29
4.2	Računski primer .....	31
4.2.1	Postopek dimenzioniranja po mejnem stanju nosilnosti .....	32
4.2.2	Preverjanje pomikov pri mejnem stanju uporabnosti .....	38
4.2.3	Uporaba računalniškega programa na konkretnem izračunanem primeru .....	39
4.2.4	Izbira indeksa zanesljivosti.....	42
4.2.5	Vhodni podatki .....	43
4.2.6	Rezultati izhodiščnega računskega modela .....	47
4.2.7	Ukrepi in rezultati izboljšanja izhodiščnega računskega modela.....	48

5	ZAKLJUČEK .....	52
6	VIRI .....	53



## 1 UVOD

Kot študent gradbeništva sem se tekom študija srečeval s standardi, ki na enostaven in učinkovit način preko enačb omogočajo določanje dimenzij različnih konstrukcijskih sistemov in materialov. Standardi navadno vsebujejo »deterministične« enačbe mejnih stanj z razlago vseh pogojev uporabe in opisom uporabljenih količin. Določevanje enačb mejnih stanj, ki ob enostavni uporabi zagotavljajo približno enako zanesljivost konstrukcij ne glede na izbiro konstrukcijskih sistemov in materialov, imenujemo kalibracija.

Za razumevanje problematike kalibracije oziroma umerjanja standardov so potrebna nekatera predznanja iz vseh področij gradbeništva, še posebno pa razumevanje osnov verjetnostnega računa. V diplomski nalogi sem se najprej srečal s problemom zanesljivosti gradbenih konstrukcij, metodami izračuna in osnovnimi principi določevanja zanesljivosti konstrukcij. Tako sem obravnaval dva enostavna primera ter splošen primer določevanja verjetnosti porušitve  $P_f$ , ki jo lahko izrazim z indeksom zanesljivosti  $\beta$ . Velja, da je pri večjem indeksu zanesljivosti  $\beta$  manjša verjetnost porušitve. Odziv konstrukcije sem predpostavil kot linearno funkcijo osnovnih slučajnih spremenljivk, ki mi pri uporabi metode prvega reda drugega momenta predstavlja zadovoljivo aproksimacijo poljubnega odziva konstrukcije. V nadaljevanju sem nazorno predstavil metodo prvega reda drugega momenta, ki predstavlja osnovo iteracijsko metodo za kalibracijo delnih varnostnih faktorjev in določevanje indeksa zanesljivosti  $\beta$  oziroma zanesljivosti konstrukcije. Konkretno sem predstavil tudi Evrokoda 5, ki podaja poleg predpostavljenih porazdelitev obtežb in odpornosti tudi ciljne indekse zanesljivosti  $\beta$  za enoletno referenčno dobo. Na podlagi Evrokoda 5 sem predstavil enostaven izračun lesenega nosilca ter z računalniškim programom CODECAL izračunal indekse zanesljivosti  $\beta$  za enoletno referenčno dobo. Z optimizacijo sem za ciljni indeks zanesljivosti  $\beta$  ter značilno razmerje stalne in prevladujoče spremenljive obtežbe  $\alpha$  določil nove optimirane delne varnostne faktorje za obtežbo in odpornost izbranega materiala.

## **2 ZANESLJIVOST KONSTRUKCIJ**

### **2.1 Definicija**

Pri projektiranju gradbenih konstrukcij inženirji poskušajo konstrukciji zagotoviti določeno varnost, da se ne bo porušila oziroma prekoračila izbranega mejnega stanja. Varnost oziroma zanesljivost konstrukcij mora biti v vseh stopnjah oziroma obdobjih gradbenih konstrukcij zagotovljena v predvideni življenjski dobi gradbenega objekta. Mejna stanja, ki jih je potrebno upoštevati in preveriti pri projektiranju gradbenih konstrukcij, lahko razdelimo v tri skupine:

1. Mejno stanje uporabnosti zagotavlja običajno uporabo gradbene konstrukcije v njeni predvideni življenjski dobi. To mejno stanje navadno opredelimo z maksimalnimi dopustnimi pomiki gradbene konstrukcije.
2. Mejno stanje poškodovanosti pomeni, da so se na delu gradbene konstrukcije pojavile razpoke ali so se nekateri elementi konstrukcije neelastično deformirali. Tako mejno stanje lahko opredelimo z mejo elastičnosti materiala.
3. Pri mejnem stanju porušitve se celotna konstrukcija ali njen del poruši.

Zanesljivost gradbenih konstrukcij določamo z različnimi računskimi verjetnostnimi metodami. Pri vseh metodah upoštevamo, da so parametri, s katerimi opisujemo konstrukcijo in obtežbo, slučajne spremenljivke. Vse parametre, ki vplivajo na varnost konstrukcije, imenujemo osnovne spremenljivke. Vzrokov za slučajnostni značaj osnovnih spremenljivk je mnogo. Vrednost osnovne spremenljivke je nedoločljiva zaradi fizikalne nedoločljivosti, statistične nedoločljivosti ter človeških napak. Fizikalni nedoločljivosti se ne moremo izogniti, saj v naravi ni dveh povsem enakih objektov, pa tudi stanje objektov se s časom spreminja. Zaradi tega je nemogoče povsem natančno določiti katerokoli količino, ki opisuje nek naravni pojav. Statistična nedoločljivost izhaja iz dejstva, da lahko vrednost osnovnih spremenljivk določimo le na podlagi relativno majhnega vzorca. Z uporabo različnih vzorcev

določimo različne lastnosti osnovnih spremenljivk. Človekove napake so pogost vzrok za velike razlike med napovedanimi in dejanskimi vrednostmi osnovnih spremenljivk. Človekove napake lahko zmanjšamo, vendar se jim v celoti ne moremo izogniti. Pri računu odziva nastopijo še nedoločljivosti zaradi nepoznavanja računskega modela in numeričnih napak. Zaradi vseh teh statističnih nedoločljivosti in napak pričakujemo, da odziv konstrukcij lahko samo ocenimo (Turk, 1994).

Mejno stanje lahko v prostoru osnovnih spremenljivk prikažemo z mejno ploskvijo, ki prikaže odziv gradbene konstrukcije.

Kot posledica nedoločljivosti osnovnih spremenljivk ter ostalih človeških in računskih napak dobi poseben pomen pri celotnem procesu proizvodnje gradbenih konstrukcij kontrola kakovosti, ki preverja in zagotavlja predvidene vrednosti osnovnih materialnih spremenljivk ter preprečuje napake pri izvedbi.

## 2.2 Račun zanesljivosti konstrukcij

Zanesljivost konstrukcij določimo oziroma ocenimo z računanjem integralov verjetnosti. Zanesljivost konstrukcije opredelimo z verjetnostjo porušitve  $P_f$ , ki narašča s padanjem zanesljivosti (Turk, 1994).

Odziv konstrukcije definiramo s spremenljivko  $M$ , ki je odvisna od dveh spremenljivk:

- $R$  – odpornost,
- $S$  – obtežba (obremenitev),

ki se spreminja glede na predpostavljeno porazdelitev obravnavanih osnovnih spremenljivk.

Izračun verjetnosti porušitve  $P_f$  oziroma indeksa zanesljivosti  $\beta$  za primere predpostavljenih porazdelitev osnovnih spremenljivk:

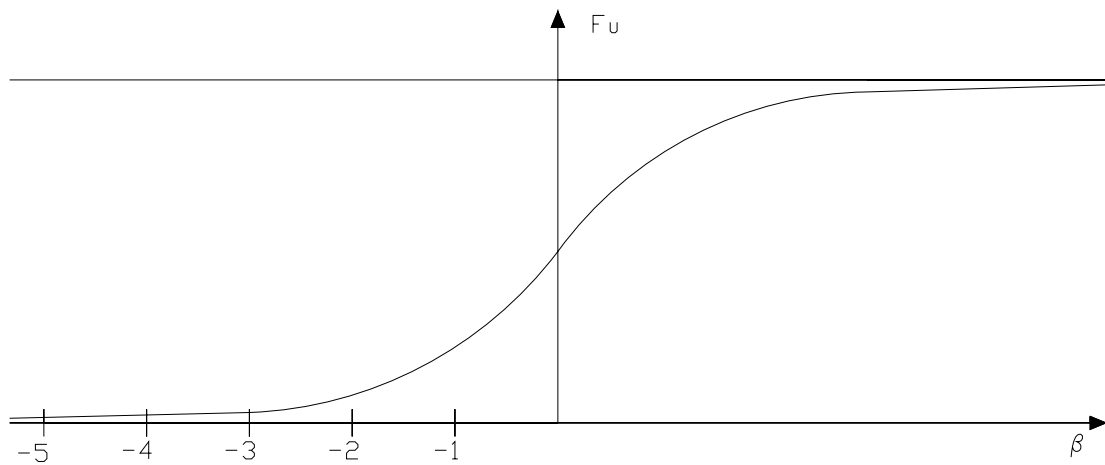
1.  $R$  in  $S$  sta neodvisni in normalno porazdeljeni osnovni spremenljivki s pričakovanimi vrednostma  $m_R$  in  $m_S$  ter standardnima odklonoma  $\sigma_R$  in  $\sigma_S$ .

Definiramo novo slučajno spremenljivko, ki predstavlja odziv konstrukcije:

$M = R - S$  je normalno porazdeljena s pričakovano vrednostjo  $m_M = m_R - m_S$  ter standardnim odklonom  $\sigma_M = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}$

Verjetnost porušitve preprosto izračunamo:

- $P_f = P[M \leq 0] = \left[ \frac{M - m_M}{\sigma_M} \leq \frac{0 - m_M}{\sigma_M} \right] = F_U \left( -\frac{m_M}{\sigma_M} \right) = F_U(-\beta)$
- $P_f = F_U(-\beta) \Leftrightarrow \beta = -F_U^{-1}(P_f)$



Slika 1: Graf  $\beta - F_U$

Za izbiro indeksa zanesljivosti je pomemben interval porazdelitvene funkcije  $F_U$ , ki podaja vrednosti indeksa zanesljivosti med  $-2$  in  $-5$ .

- $$P_f = F_U\left(-\frac{m_R - m_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}\right)$$
- $$\beta = \frac{m_R - m_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}$$
 ob predpostavki normalne porazdelitve.

2.  $R$  in  $S$  sta neodvisni in lognormalno porazdeljeni osnovni spremenljivki s pričakovanima vrednostma  $m_R$  in  $m_S$  ter standardnima odklonoma  $\sigma_R$  in  $\sigma_S$ .

Definiramo novo slučajno spremenljivko, ki predstavlja odziv konstrukcije:

$M_L = \frac{R}{S}$  je lognormalno porazdeljena z mediano  $\tilde{m}_{M_L} = \frac{\tilde{m}_R}{\tilde{m}_S}$  ter standardnim odklonom

$$\sigma_{M_L} = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}$$

Verjetnost porušitve je definirana kot:

$$\blacksquare P_f = P\left[\frac{R}{S} \leq 1\right] = P[M_L \leq 1]$$

Produkt oziroma koeficient dveh lognormalno porazdeljenih osnovnih spremenljivk je tudi porazdeljen lognormalno.

$M_L$  je porazdeljen lognormalno, pri čemer velja:

$$\blacksquare \tilde{m}_{M_L} = \frac{\tilde{m}_R}{\tilde{m}_S} \quad \sigma_{\ln M_L} = \sqrt{\sigma_{\ln R}^2 + \sigma_{\ln S}^2}$$

Verjetnost porušitve izračunamo:

$$\blacksquare P_f = F_U\left(\frac{\ln 1 - \ln \tilde{m}_{M_L}}{\sigma_{\ln M_L}}\right) = F_U\left(\frac{-\ln \tilde{m}_{M_L}}{\sigma_{\ln M_L}}\right) = F_U(-\beta)$$

$$\blacksquare \beta = -\frac{\ln \tilde{m}_{M_L}}{\sigma_{\ln M_L}} \quad \text{ob predpostavki lognormalne porazdelitve}$$

$$\blacksquare P_f = F_U(-\beta) \Leftrightarrow \beta = -F_U^{-1}(P_f)$$

3. V osnovnem primeru sta odpornost konstrukcije  $R$  in obtežba na konstrukcijo  $S$  poljubno porazdeljeni osnovni spremenljivki. Poznamo njuni gostoti verjetnosti  $f_S$  in  $f_R$ . Obe količini morata biti izraženi v enakih fizikalnih enotah. Verjetnost, da se bo konstrukcija porušila, izračunamo z enačbo:

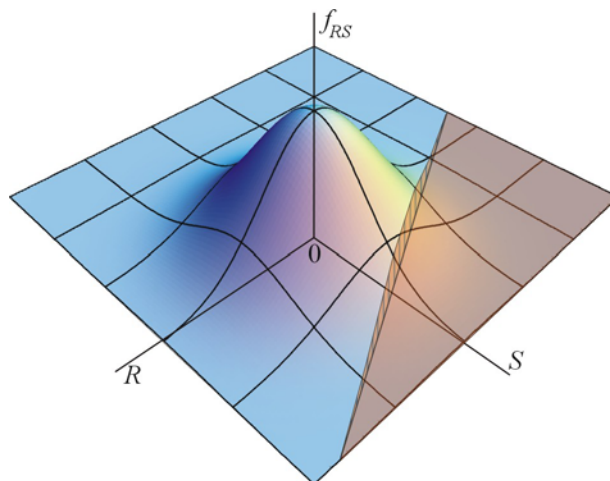
$$\blacksquare P_f = P[R \leq S] = P[R - S \leq 0] = P\left[\frac{R}{S} \leq 0\right] = P[G(R, S) \leq 0]$$

Verjetnost porušitve izračunamo z integriranjem funkcije gostote verjetnosti po področju, kjer je izpolnjen pogoj ( $R \leq S$ ). V tem primeru lahko zapišemo enačbo:

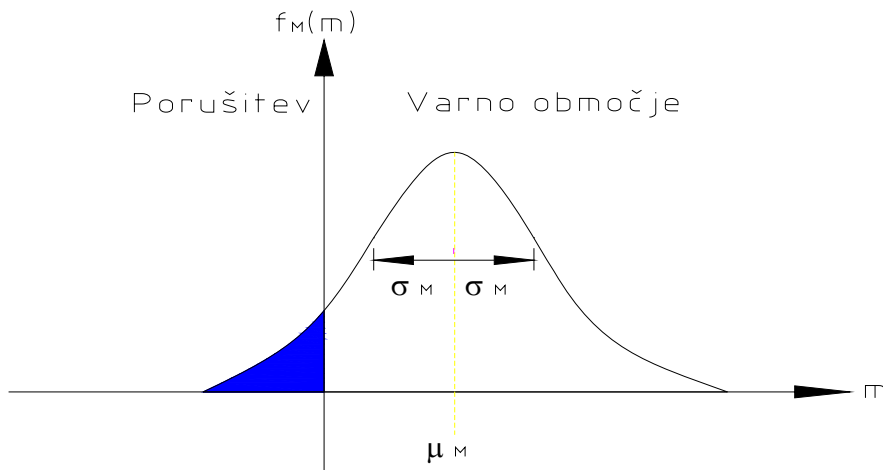
$$\blacksquare P_f = P[R - S \leq 0] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{r=s} f_{RS}(r, s) dr ds$$

V primeru, da sta  $S$  in  $R$  neodvisni slučajni spremenljivki lahko zapišemo:

$$\blacksquare P_f = P[R - S \leq 0] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{r=s} f_R(r) f_S(s) dr ds = \int_{-\infty}^{\infty} F_R(s) f_S(s) ds$$



Slika 2: Integracije meje porušitve



Slika 3: Opis gostote verjetnosti za normalno porazdeljen odziv konstrukcije  $M$

Očitno je, da se pri prvem in drugem primeru račun verjetnosti porušitve  $P_f$  zelo poenostavi. Pri tem uvedemo novo količino  $\beta$ , ki jo imenujemo indeks zanesljivosti. Ta količina je pogosto uporabljena kot alternativni prikaz verjetnosti porušitve. Indeks zanesljivosti  $\beta$  je tudi razdalja od srednje vrednosti slučajne spremenljivke  $\beta$  do izhodišča reduciranega koordinatnega sistema, merjeno v standardnih deviacijah  $\sigma_M$ , oziroma razdalja med koordinatnim izhodiščem in mejno črto v reduciranem koordinatnem sistemu, pri čemer sta osnovni spremenljivki  $R$  in  $S$  transformirani z enačbama:

- $R' = \frac{R - m_R}{\sigma_R}$
- $S' = \frac{S - m_S}{\sigma_S}$



Ob predpostavki, da je funkcija mejnega stanja  $M = g(\{X\})$  linearna funkcija, lahko posplošimo osnovni problem na poljubno število slučajnih spremenljivk.

Definiramo novo slučajno spremenljivko, ki predstavlja odziv konstrukcije:

$M = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n$  če so  $X_i$  normalno porazdeljeni in neodvisni, je tudi pričakovana vrednost  $m_M = a_0 + a_1m_{X_1} + a_2m_{X_2} + \dots + a_nm_{X_n}$

in standardni odklon  $\sigma_M = \sqrt{a_1^2\sigma_{X_1}^2 + a_2^2\sigma_{X_2}^2 + \dots + a_n^2\sigma_{X_n}^2}$ .

Verjetnost porušitve je definirana kot:

$$\begin{aligned} \blacksquare P_f &= P[M \leq 0] = P\left[\frac{M - m_M}{\sigma_M} \leq \frac{0 - m_M}{\sigma_M}\right] = F_U\left(-\frac{m_M}{\sigma_M}\right) = \\ &= F_U\left(-\frac{a_0 + a_1m_{X_1} + a_2m_{X_2} + \dots + a_nm_{X_n}}{\sqrt{a_1^2\sigma_{X_1}^2 + a_2^2\sigma_{X_2}^2 + \dots + a_n^2\sigma_{X_n}^2}}\right) = F_U(-\beta), \end{aligned}$$

kjer so  $X_1, X_2, \dots, X_n$  neodvisne in normalno porazdeljene slučajne spremenljivke.

$$\blacksquare P_f = F_U(-\beta) \Leftrightarrow \beta = -F_U^{-1}(P_f)$$

Za dve osnovni slučajni spremenljivki, ob predpostavki, da je funkcija mejnega stanja  $M = g(\{X\})$  linearna, lahko zapišemo osnovni problem kot:

Definiramo novo slučajno spremenljivko, ki predstavlja odziv konstrukcije:

$M = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2$ , če sta  $X_1$  in  $X_2$  normalni in neodvisni je tudi pričakovana vrednost  $m_M = a_0 + a_1m_{X_1} + a_2m_{X_2}$

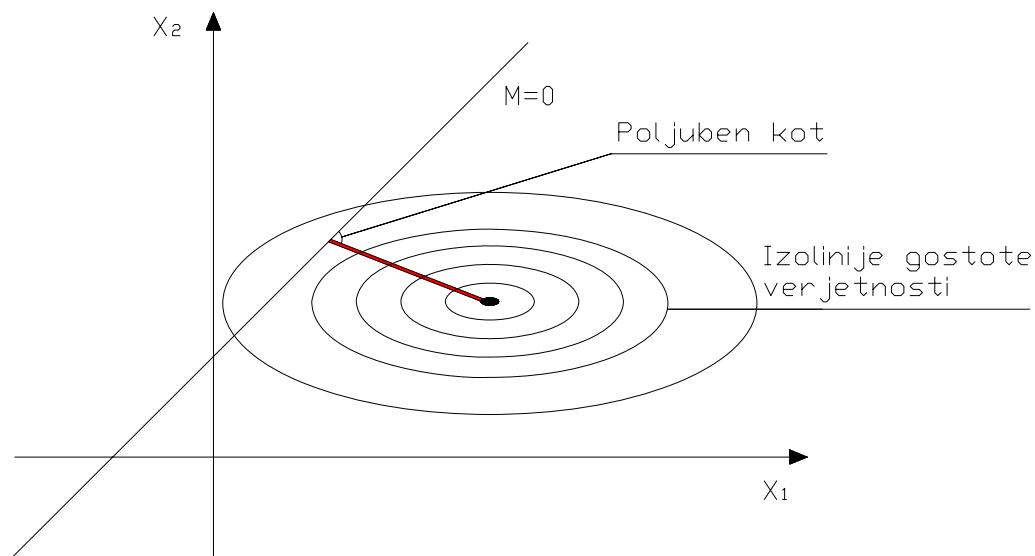
ter standardni odklon  $\sigma_M = \sqrt{a_1^2\sigma_{X_1}^2 + a_2^2\sigma_{X_2}^2}$ .

Verjetnost porušitve je definirana kot:

$$\begin{aligned} \blacksquare P_f &= P[M \leq 0] = P\left[\frac{M - m_M}{\sigma_M} \leq \frac{0 - m_M}{\sigma_M}\right] = F_U\left(-\frac{m_M}{\sigma_M}\right) = \\ &= F_U\left(-\frac{a_0 + a_1 m_{X_1} + a_2 m_{X_2}}{\sqrt{a_1^2 \sigma_{X_1}^2 + a_2^2 \sigma_{X_2}^2}}\right) = F_U(-\beta) \quad , \end{aligned}$$

kjer sta  $X_1, X_2$  neodvisni normalno porazdeljeni slučajni spremenljivki.

$$\blacksquare P_f = F_U(-\beta) \Leftrightarrow \beta = -F_U^{-1}(P_f)$$

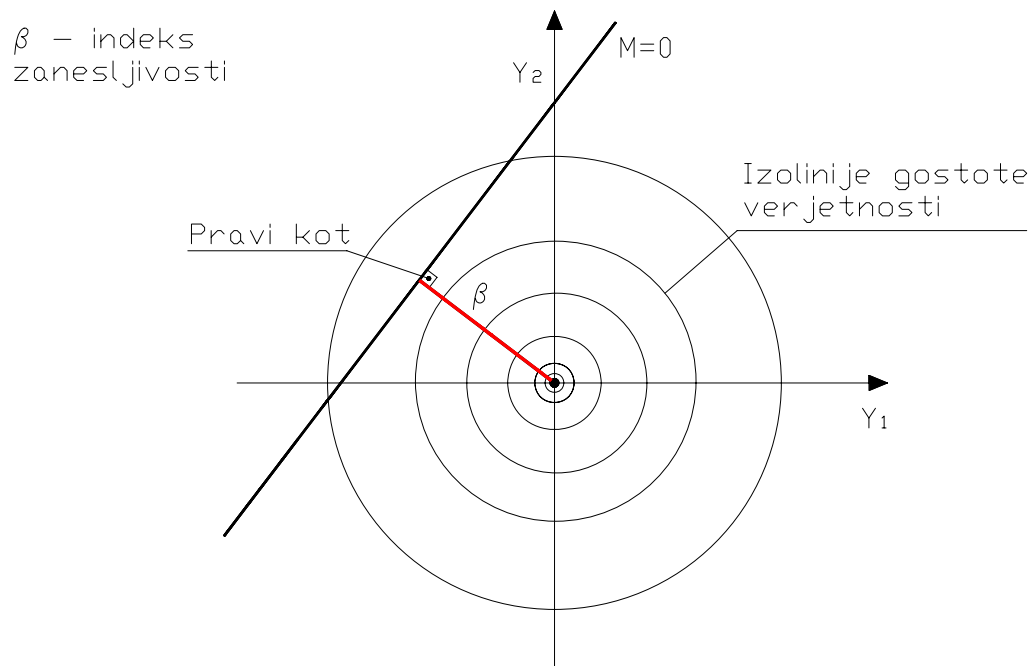


Slika 4: Osnovni slučajni spremenljivki, ob predpostavki, da je funkcija mejnega stanja  $M = g(\{X\})$  linearna

Enačba za transformacijo slučajnih spremenljivk:

$$\begin{aligned} \blacksquare Y_1 &= \frac{X_1 - m_{X_1}}{\sigma_{X_1}} \quad \Rightarrow \quad X_1 = Y_1 \sigma_{X_1} + m_{X_1} \\ \blacksquare Y_2 &= \frac{X_2 - m_{X_2}}{\sigma_{X_2}} \quad \Rightarrow \quad X_2 = Y_2 \sigma_{X_2} + m_{X_2} \end{aligned}$$

Če se preselimo v standardni prostor, kjer izolinije, ki predstavljajo črte z enakimi  $f_{RS}$ , postanejo krogi, dobimo naslednje enačbe za odziv konstrukcije:



Slika 5: Transformirani osnovni slučajni spremenljivki v reduciranem koordinatnem sistemu, kjer je  $M = g(\{X\})$  linearna

$$M = a_0 + a_1 Y_1 \sigma_{X_1} + a_1 m_{X_1} + a_2 Y_2 \sigma_{X_2} + a_2 m_{X_2} \quad \Rightarrow$$

$$M = \underline{a_0 + a_1 m_{X_1} + a_2 m_{X_2}} + \underline{a_1 \sigma_{X_1} Y_1} + \underline{a_2 \sigma_{X_2} Y_2} \quad \Rightarrow$$

$$M = b_0 + b_1 Y_1 + b_2 Y_2 \quad \Rightarrow \quad \text{linearna funkcija}$$

Enačbo premice lahko zapišemo na različne načine:

$$M = 0 = b_0 + b_1 Y_1 + b_2 Y_2 \quad / \quad \frac{1}{l}, \quad \text{kjer je } l = \sqrt{b_1^2 + b_2^2}$$

$$\frac{b_0}{l} + \frac{b_1}{l} Y_1 + \frac{b_2}{l} Y_2 = 0,$$

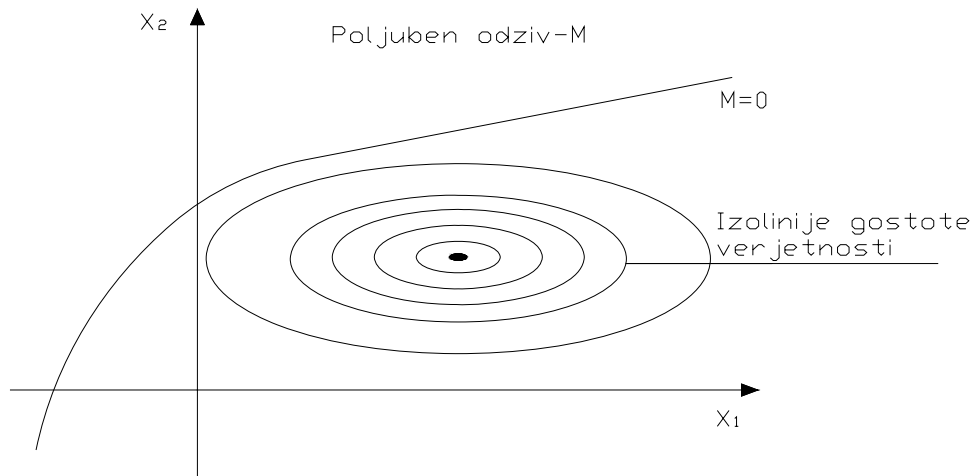
kjer sta  $\frac{b_1}{l} Y_1$  in  $\frac{b_2}{l} Y_2$  smerna kosinusa

$\beta = \frac{b_0}{l} \Rightarrow$  indeks zanesljivosti, ki predstavlja najkrajšo razdaljo od izhodišča do premice v standardnem (reduciranem) koordinatnem sistemu.

### 2.3 Metoda prvega reda drugega momenta

Metoda prvega reda drugega momenta temelji na enačbah osnovne naloge računa zanesljivosti, kjer so slučajne spremenljivke normalno porazdeljene (Turk, G,1994). Mejno stanje navadno ni linearno, mejna funkcija  $M = g(\{y\})$  je torej nelinearna. Za približen izračun verjetnosti porušitve moramo funkcijo  $M = g(\{y\})$  razviti v Taylorjevo vrsto okoli neke točke  $y^*$  in upoštevati le člene prvega reda. Izbira točke  $y^*$  je za približen izračun oziroma oceno prvih dveh momentov zelo pomembna. Najbolje je izbrati točko  $y^*$ , ki leži na mejni ploskvi, in sicer tam, kjer je razdalja do izhodišča v reduciranem koordinatnem sistemu najkrajša. Ta točka se imenuje računski točka in predstavlja točko na mejni ploskvi, kjer je verjetnost oziroma gostota verjetnosti porušitve največja. Mejno ploskev tako približno ocenimo s tangentno ravnino v računski točki. Na ta način dobimo indeks zanesljivosti  $\beta$ :

$$\beta = \min_{g(\{y\})=0} \sqrt{\{y\}^T \{y\}}.$$



Slika 6: Osnovni slučajni spremenljivki, kjer je funkcija mejnega stanja  $M = g(\{X\})$  poljubna

Izračunati moramo verjetnost porušitve  $P_f$ .

Odziv konstrukcije  $M = g(\{y\})$  oziroma mejno stanje, ki je nelinearno, lahko približno zapišemo kot linearno ploskev. Račun verjetnosti porušitve po metodi prvega reda – drugega momenta poteka v naslednjih korakih:

1. Transformiramo slučajne spremenljivke  $\{X\}$  v reducirani koordinatni sistem  $\{Y\}$ .
2. Transformiramo mejno ploskev  $g(\{X\})=0$  v mejno ploskev  $g(\{Y\})=0$  v reduciranem koordinatnem sistemu.
3. Izberemo začetno vrednost  $\beta^{(1)}$  in začetni vektor  $\{\alpha^{(1)}\}$ , kjer je  $\{\alpha\}$  enotski vektor ki je pravokoten na tangencialno ravnino mejne ploskve :

$$\blacksquare \quad \{\alpha\} = \frac{1}{l} \frac{\partial g(\{y\})}{\partial \{y\}} .$$

Računsko točko izračunamo z enačbo:

- $\{y\} = \beta\{\alpha\}$ .

4. Iz enačbe  $g(\{y\}) = g(\{\alpha\}^i \beta^i) = 0$  izračunamo  $\beta^{i+1}$ .

5. Izračunamo vektor  $\{\alpha^{(i+1)}\} = \frac{1}{l} \frac{\delta g(\beta^{(i+1)} \alpha^{(i)})}{\delta(y)}$ . Zagotoviti moramo, da je vektor enotski.

Iz tega razloga odvode delimo z njegovo dolžino  $l$ .

6. V primeru, da je razlika med  $\beta^{(i+1)}$  in  $\beta^i$  oziroma med  $\alpha^{(i+1)}$  in  $\alpha^i$  manjša od zahtevane natančnosti, je račun končan. V nasprotnem primeru povečamo  $i$  za ena in ponovimo račun od 4. točke dalje.

Prikazan je primer za dve slučajni spremenljivki, ko nelinearen odziv  $M$  razvijemo v Taylorjevo vrsto, zanemarimo višje člene in tako dosežemo zadovoljivo natančen približek enačbe linearne odziva.

Odziv  $M$  zapišemo kot funkcijo  $g$  dveh slučajnih spremenljivk:

$$\blacksquare \quad M = g(y_1, y_2) = g(y)$$

Odziv  $M = g(y)$  razvijemo v Taylorjevo vrsto:

$$g(y) = g(y^*) + \sum \frac{\partial g}{\partial y} \Big|_{y^*} (y - y^*) + \text{višji člani} \quad \Rightarrow$$

$$g(y) \cong g(y^*) + \sum \frac{\partial g}{\partial y} \Big|_{y^*} (y - y^*) \quad \Rightarrow$$

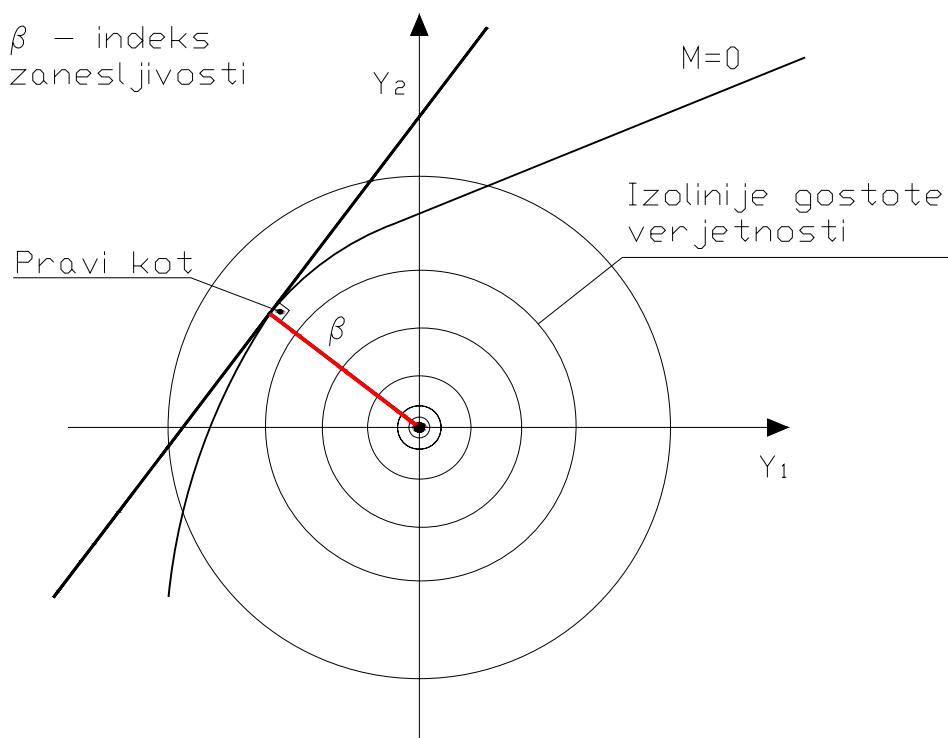
$$g(y) \cong g(y^*) + \sum \frac{\partial g}{\partial y} \Big|_{y^*} y^* + \sum \frac{\partial g}{\partial y} \Big|_{y^*} y \quad \Rightarrow$$

$$g(y_1, y_2) \cong g(y_1^*, y_2^*) - \frac{\partial g}{\partial y_1} y_1^* - \frac{\partial g}{\partial y_2} y_2^* + \frac{\partial g}{\partial y_1} y_1 + \frac{\partial g}{\partial y_2} y_2 \quad \Rightarrow$$

$$g(y_1, y_2) \cong b_0 + b_1 y_1 + b_2 y_2 \quad \Rightarrow \quad \text{aproximirana linearna funkcija}$$

Za oceno verjetnosti porušitve je najugodnejše, če vzamemo tangentno ravnino, ki je najbližje središču v reduciranem koordinatnem sistemu.





Slika 7: Približna določitev indeksa zanesljivosti  $\beta$  po metodi prvega reda drugega momenta

## **2.4 Standardi za dimenzioniranje lesenih konstrukcij**

### **2.4.1 Ciljna stopnja varnosti pri lesenih konstrukcijah**

Analiza zanesljivosti gradbenih konstrukcij je bila izvedena z uporabo različnih ciljnih nivojev zanesljivosti. Rezultat analiz je pokazal, da višji indeksi zanesljivosti povzročijo težje določanje vrednosti varnostnih faktorjev, ki so uporabljeni pri različnih gradbenih konstrukcijah. Pri tem so bile analizirane vse statistične napake, ki se pojavijo pri obravnavanju problematike gradbenih konstrukcij. Cilj standardov je določitev racionalnega razmerja med škodo, povzročeno s porušitvami, ter posledicami zaradi uporabljanja višjih varnostnih faktorjev (težje določanje varnostnih faktorjev). Analize so pokazale, da je dviganje vrednosti varnostnih faktorjev zelo neučinkovito pri zagotavljanju oziroma izboljševanju varnosti. Tako je na primer opazovanje med leti 1980 in 2000 na Finskem je pokazalo, da je 10 odstotno povišanje meje varnosti pri lesenih konstrukcijah povzročilo najmanj 200 – kratno povišanje stroškov v primerjavi s prednostni – manj porušitev (Ranta - Manus, Torratti, 2002).

Zato je predlagano, da je sedanji nivo zanesljivosti gradbenih konstrukcij v pravilnikih ustrezen, uporabljena naj bodo druga merjenja očitnih napak, ki povzročijo porušitve pri gradbenih konstrukcijah.

Verjetnostne analize se za kalibracijo uporabljajo od 1970. leta dalje. Prvi izrazi so uporabljali normalno porazdelitev za obtežbe in lognormalno porazdelitev za odpornost materialov. Sprejemljivi nivo varnosti je bil določen s primerjavo rezultatov in pridobljenimi izkušnjami iz preteklosti. Od takrat dalje je znanost bolje spoznala karakteristike materialov in porazdelitve obtežb. Pogosto se za naravne obtežbe predlagajo porazdelitve ekstremnih vrednosti. Odpornost žaganega lesa tako bolje opiše Weibullova porazdelitev kot pa lognormalna porazdelitev. Izbira porazdelitvenih funkcij ima očitno pomemben vpliv na rezultat pri verjetnostni analizi. Sprememba porazdelitve glavne spremenljive obtežbe iz normalne v Gumbelovo porazdelitev, s tem da ostali varnostni faktorji ostanejo nespremenjeni, poveča višino lesenih gred za 10 – 20 odstotkov, oziroma če se dimenzije ne spremenijo, varnostni indeks  $\beta$  pade iz vrednosti 4.7 na 4.0.

V želji, da zagotovijo čim večjo stopnjo varnosti za vse prebivalce, lahko pod pritiskom moderni znanstveniki dvignejo nivo varnosti, čeprav je odnos med ciljnim indeksom

zanesljivosti  $\beta_i$  in varnostjo prebivalcev nejasen. Cilj je analizirati učinek izbire ciljnega indeksa zanesljivosti  $\beta_i$  in porazdelitvenih funkcij na potrebne varnostne faktorje ter dobiti racionalen zaključek ob zavedanju vseh statističnih napak in nedoločljivosti. Porušitve, ki so se zgodile zadnjih 20 let na Finskem, so bile analizirane in razdeljene v dve kategorije:

- nesreče, ki bi se jim lahko izognili s povečanjem varnostnih mej
- nesreče, ki so neodvisni od nivoja varnosti (človeške napake).

Z ocenjevanjem posledic oziroma stroškov škode nesreč, ki bi se jim lahko izognili s povečanjem varnostnih mej in primerjanjem le – teh s stroški materiala v vseh lesenih konstrukcijah za zagotavljanje večje varnosti, je bila izvedena analiza, ki je kot je že omenjeno pokazala neučinkovitost višanja nivoja zanesljivosti gradbenih konstrukcij. Omenjena metoda primerjave stroškov je lahko uporabljena takrat, ko se stroški sedanjega nivoja varnosti primerjajo s stroški višjega nivoja varnosti.

JCSS (Joint Committee on Structural Safety) za zagotavljanje zanesljivosti gradbenih konstrukcij priporoča naslednje ciljne vrednosti indeksov zanesljivosti oziroma verjetnosti porušitev za enoletno referenčno dobo (Faber, Sørensen, 2002):

Relativni stroški stopnje varnosti	Majhne posledice porušitve	Zmerne posledice porušitve	Velike posledice porušitve
Visoki	$\beta = 3.1 (P_f \approx 10^{-3})$	$\beta = 3.3 (P_f \approx 10^{-4})$	$\beta = 3.7 (P_f \approx 10^{-4})$
Normalni	$\beta = 3.7 (P_f \approx 10^{-4})$	$\beta = 4.2 (P_f \approx 10^{-5})$	$\beta = 4.4 (P_f \approx 10^{-5})$
Nizki	$\beta = 4.2 (P_f \approx 10^{-5})$	$\beta = 4.4 (P_f \approx 10^{-5})$	$\beta = 4.7 (P_f \approx 10^{-6})$

Preglednica 1: Priporočene vrednosti indeksov zanesljivosti  $\beta$

## 2.4.2 Primer standarda - Evrokod

Analiza zanesljivosti v SIST EN 1995-1-1:2004 – Evrokod za lesene konstrukcije uporablja naslednjo projektno enačbo:

$$\gamma_G \sigma_{Gk} + \gamma_Q \sigma_{Qk} \leq \frac{k_{\text{mod}} f_{0.05}}{\gamma_M},$$

kjer je:

- $f_{0.05}$  – peti centil porazdelitve trdnosti
- $k_{\text{mod}}$  – modifikacijski faktor za trajanje obtežbe
- $\sigma_{Gk}$  – napetost, povzročena s karakteristično stalno (lastno) obtežbo
- $\sigma_{Qk}$  – napetost, povzročena s karakteristično spremenljivo obtežbo
- $\gamma_G, \gamma_Q$  – delna varnostna faktorja za stalno in spremenljivo obtežbo
- $\gamma_M$  – delni varnostni faktor za material

Razmerje med spremenljivo in celotno obtežbo je določeno z enačbo:

$$\alpha = \frac{\sigma_{Qk}}{\sigma_{Gk} + \sigma_{Qk}}$$

Funkcija mejnega stanja je:

$$g = \frac{k_{\text{mod}} f_{0.05}}{\gamma_M} - (1 - \alpha) \gamma_G \sigma_k - \alpha \gamma_Q \sigma_k \geq 0$$

Verjetnost porušitve  $P_f$  je izračunana z numerično analizo (metoda prvega reda drugega momenta). Iterativno je izračunan  $\gamma_M$  za privzeto verjetnost napake  $P_f$ . Indeks zanesljivosti  $\beta$  je izračunan iz verjetnosti porušitve  $P_f$  z uporabo običajne domneve:

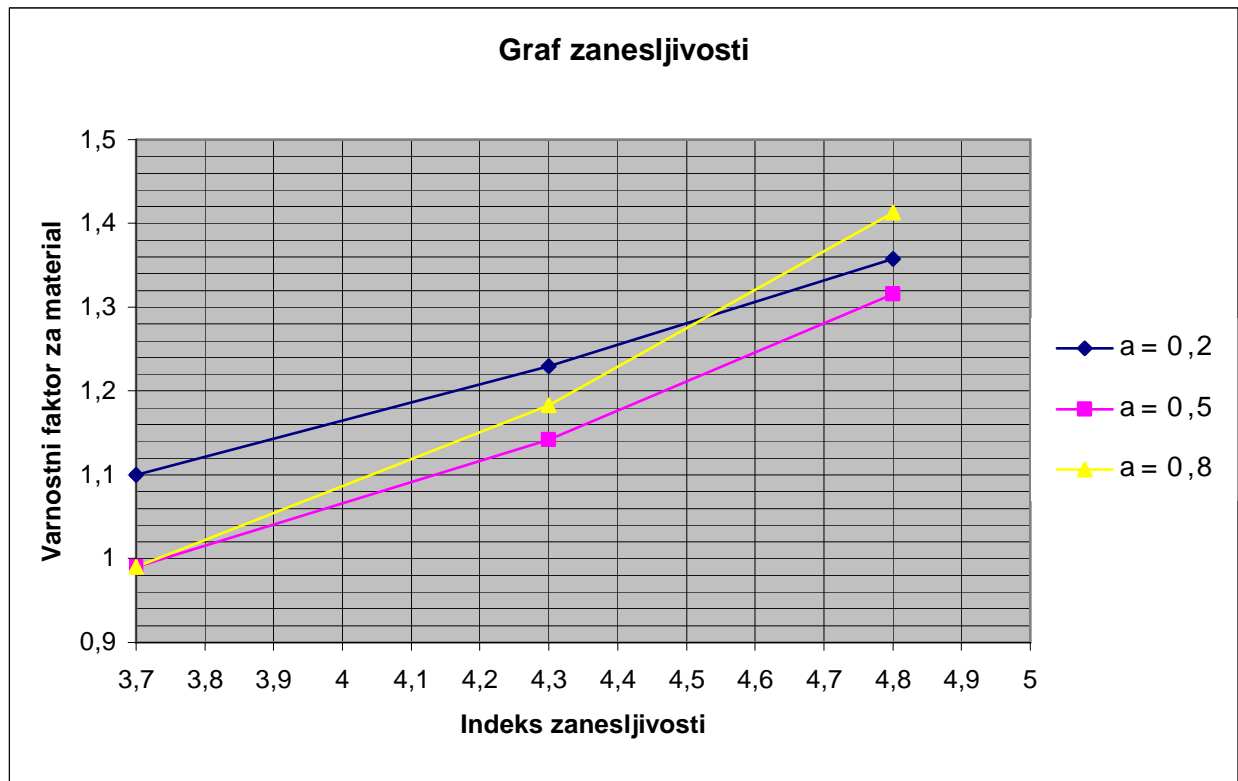
$$P_f = P(g \leq 0) = \Phi(-\beta) = F_U(-\beta)$$

V preglednici 2 so opisane spremenljivke, ki so uporabljene v referenčnem primeru, ki je zelo podoben finskemu primeru. V tem računu je vsa statistična spremenljivost vključena v funkcijah odpornosti in funkcijah obtežbe in ni nobene dodatne varnosti, ki bi upoštevala nenatančnost oziroma napake pri računskem modelu in izbranih dimenzijah. Vrednosti v preglednici 2 so prirejene tako, da se funkcije obtežbe ujemajo z sedanjim razumevanjem stalnih in naravnih obtežb. Porazdelitev odpornosti pa je rezultat kompromisa med odpornostjo žaganega in industrijsko obdelanega lesa (Ranta-Manus, Torratti, 2002).

Rezultati izračuna so prikazani v sliki 8, ki prikaže skoraj linearno zvezo med  $\gamma_M$  in indeksom zanesljivosti  $\beta$ , kjer je nagib odvisen od razmerja med spremenljivo in celotno obtežbo  $\alpha$ . Graf zanesljivosti prikazuje, da je  $P_f = 10^{-5}$ , ( $\beta = 4.3$ ), če je  $\gamma_M = 1.2$  za lahke konstrukcije z vrednostjo razmerja med spremenljivo in celotno obtežbo  $\alpha = 0.8$ .

	Porazdelitev	COV (%)	Centil (%)	Vrednost
$\sigma_{Gk}$	normalna	5	50	
$\sigma_{Qk}$	Gumbelova	40	98	
$f_{0.05}$	lognormalna	20	5	
$\gamma_G$				-1.2
$\gamma_Q$				1.6
$\alpha$				0.2, 0.5, 0.8

Preglednica 2: Stohastični parametri referenčnega primera:



Slika: 8: Odvisnost indeksa zanesljivosti  $\beta$  od delnega materialnega varnostnega faktorja  $\gamma_M$  za različna razmerja stalne in spremenljive obtežbe  $\alpha$

## **3 KALIBRACIJA**

### **3.1 Definicija kalibracije**

- »calibration - umerjanje«

Kalibracija je v gradbenem smislu razumljena kot proces določanja varnostnih faktorjev, ki se uporabljajo pri projektiranju gradbenih konstrukcij. Vrednosti varnostnih faktorjev so numerična števila, ki so določena v pravilnikih za dimenzioniranje gradbenih konstrukcij, in so določena z namenom, da se doseže želen nivo zanesljivosti gradbenih konstrukcij.

### **3.2 Vrste kalibracij**

Vrednosti varnostnih faktorjev se določa na več načinov (Madsen, Krenk, Lind, 1986).

Ločimo:

- določanje vrednosti varnostnih faktorjev po inženirski presoji
- primerna uporaba varnostnih faktorjev
- postopek optimizacije standardov oziroma varnostnih faktorjev
- s kombinacijo vseh treh pristopov določanja varnostnih faktorjev.

#### **3.2.1 Določanje varnostnih faktorjev po inženirski presoji**

To je bil v preteklosti najbolj pogost pristop pri določanju varnostnih faktorjev za dimenzioniranje gradbenih konstrukcij. Gre za določanje vrednosti varnostnih faktorjev na podlagi izkušenj iz pretekle uporabe varnostnih faktorjev, ki so se izkazale za ustrezne, kar pomeni, da je bil izpolnjen kriterij zanesljivosti gradbenih konstrukcij. Nasprotno so slabi rezultati izbire varnostnih faktorjev znak za spremembo (največkrat drastično povečanje) vrednosti varnostnih faktorjev, ki izpolnijo želen nivo zanesljivosti gradbenih konstrukcij. Pri tem pristopu obstaja nevarnost ekonomskega vpliva na izbiro varnostnih faktorjev (zmanjšanje vrednosti) na račun manjše zanesljivosti oziroma varnosti gradbenih objektov.

Cilj določanja varnostnih faktorjev s presojo je, da se z leti izkušenj postopoma sestavi stabilen pravilnik, ki na podlagi empiričnih rezultatov določa varnostne faktorje in na katerega ne vplivata več niti težnja po izboljšanju zanesljivosti gradbenih konstrukcij niti ekonomsko – stroškovni vplivi.

Želen rezultat presoje varnostnih faktorjev so torej optimalne vrednosti varnostnih faktorjev v odnosu med zanesljivostjo gradbenih objektov in stroškov izvedbe le-teh.

### **3.2.2 Primerna uporaba varnostnih faktorjev**

Ta se uporabi takrat, ko je treba »stare« pravilnike zamenjati z »novimi« standardi, saj kljub temu, da so bili »stari« pravilniki veliko let v uporabi in so se izkazali za ustrezne, jih je potrebno bistveno spremeniti. Razmeroma enostaven in konzervativen način kalibracije pravilnikov je, da dopolnimo oziroma umerimo nove varnostne faktorje tako, da predpostavimo enake minimalne pogoje fizičnih dimenzij, kot jih pogojujejo »stari« pravilniki. Velikokrat to ni najugodnejša rešitev, a predstavlja korak k uspešnemu izvajanju novih standardov.

Ker so novi standardi usklajeni s starimi, se zdi ta vrsta kalibracije jalova oziroma neustrezna. Zakaj torej pripravljati nove pravilnike, če ti ne prinašajo ne večje zanesljivosti gradbenih konstrukcij in tudi ne boljših ekonomskih rezultatov, pri čemer sprememba pravilnikov pomeni neprijetnost za vse udeležence procesa gradnje. Razlog je v tem, da vse države težijo k temu, da so pravilniki sosednjih držav čim bolj podobni, kar omogoča tako lažje gospodarsko in ekonomsko sodelovanje kot sodelovanje posameznih držav na nivoju razvoja tehnologij, novih znanj ter dognanj v stroki.

### **3.2.3 Postopek optimizacije standardov oziroma vrednosti varnostnih faktorjev**

To je uraden proces eksplicitnega umerjanja oziroma kalibracije standardov. Po tem postopku je izdelana večina današnjih standardov in pravilnikov. Pri postopku optimizacije oziroma umerjanja standardov ločimo naslednje korake:

1. korak :

- določitev območja standarda (parametriziran niz objektov, na katere se standard nanaša)
- definiranje ustreznih statističnih napak in nedoločljivosti



- standard je določen v matematični obliki (enačba ter pogoji uporabe enačbe) in je kot element imenovan standardni format
- parametri standardnega formata so obravnavani kot slučajne spremenljivke (varnostni faktorji)
- ko varnostni faktorji dosegajo različne vrednosti, se oblikujejo (generirajo) različne enačbe standarda. Originalna enačba je le ena izmed mnogih realiziranih enačb standarda. Vsaka realizacija končne enačbe standarda je sestavljena iz množice vrednosti varnostnih faktorjev, ki ustreza izbranemu območju parametrov standardnega formata.

2. korak :

- določitev najbolj objektivne enačbe, ki je sestavljena iz množice slučajnih vrednosti obravnavanih varnostnih faktorjev, glede na naslednje stopnje:
- 1. stopnja je določitev projektne enačbe z določenimi delnimi varnostnimi faktorji
- 2. stopnja je določitev ciljnega indeksa zanesljivosti  $\beta_i$  za predvidene frekvence (variacije) v določenem intervalu (nizu) podatkov
- 3. stopnja je določitev konstantne varnosti v določenem intervalu (nizu) podatkov
- 4. stopnja je določitev maksimalnega izkoristka

3. korak :

- določitev mere natančnosti za posamezen preizkus varnosti, saj enačba ne more biti hkrati enostavna in objektivna. Zato se določijo najbolj pomembni konstrukcijski podatki, za katere je verjetnost, da so najbližji objektivnim podatkom, največja.
- Primer:
- če se večina obtežb, tako stalnih kot spremenljivih, nahaja v intervalu  $(0.5 - 1)$ , kjer je v splošnem bolj verjetno, da dosežemo objektivni cilj v tem intervalu, kot pa v intervalu  $(0 - \infty)$ . Tako dobimo pogojno funkcijo, ki velja le za izbran interval podatkov.

4. korak :

- določitev mere natančnosti med realizirano in objektivno enačbo standarda

Primer:

- $\beta_i$  – je ciljni indeks zanesljivosti
- $\beta$  – je dejanska vrednost, dobljena s preizkusnim izračunom
- razlika med  $\beta_i - \beta$  se spreminja med obravnavanimi podatki in lahko doseže tako pozitivno kot negativno vrednost.
- kriterij za zadovoljivo mero natančnosti med realizirano in objektivno enačbo je lahko, da pričakovana vrednost  $(\beta_i - \beta)^2$  ne sme presežati izbrane mere natančnosti.

5. korak :

- izbira oblike enačbe glede na enostavnost postopka
- glede na to, da še tako kompleksna oblika enačbe ne more doseči objektivnega (dejanskega) rezultata, je potrebno izvesti vrsto preiskav, ki določijo razmeroma enostavne oblike enačb (postopkov), ki zadovoljijo zahtevano mero natančnosti (projektni postopki).
- Končni rezultat je optimalna oblika enačbe, ki se najbolj približa objektivnemu (dejanskemu) rezultatu.
- S kriterijem natančnosti tako izberemo tisto obliko enačbe, ki je relativno enostavna in hkrati izpolnjuje zahtevani pogoj natančnosti.

### 3.3 Optimizacija standardov

V zadnjih desetletjih je bila kalibracija oziroma umerjanje delnih varnostnih faktorjev v standardih za gradbene konstrukcije izvedena na podlagi stohastičnih zakonov v številnih praktičnih gradbenih pravilnikih. Kalibracija je načeloma izvedena za določeno vrsto konstrukcij, uporabljene materiale in vrste obtežb na tak način, da je merjena zanesljivost z varnostnim indeksom  $\beta$ , oziroma da je enoletna verjetnost porušitve ocenjena na podlagi uporabe kalibriranih oziroma umerjenih delnih varnostnih faktorjev. Merjena zanesljivost gradbenih konstrukcij se mora čim bolj približati indeksom zanesljivosti, ki so dobro dokazani v projektni praksi in metodah (Sørensen, 2001).

V metodi, ki uporablja delne varnostne faktorje, so navadno upoštevani posamezni elementi. Veljati mora, da projektna odpornost  $R_d$  večja ali enaka od učinka projektne obtežbe  $S_d$  za vsak posamezen element in celotno konstrukcijo. Ta zahteva mora biti izpolnjena za vrsto različnih obtežnih kombinacij. Projektna vrednost učinka obtežbe je določena na podlagi ločenja na stalne, spremenljive in morebitno nezgodne obtežbe. Projektna vrednost za stalno in spremenljivo obtežbo je:

- $G_d = \gamma_G G_C$

- $Q_d = \gamma_Q Q_C$

kjer je  $\gamma_G$  delni varnostni faktor za stalno obtežbo,  $\gamma_Q$  je delni varnostni faktor za spremenljivo obtežbo,  $G_C$  je karakteristična vrednost stalne obtežbe in  $Q_C$  karakteristična vrednost spremenljive obtežbe. Običajno vzamemo 50. centil za  $G_C$  in 98 centil za  $Q_C$  v porazdelitveni funkciji od enoletnega maksimuma obtežbe.

Projektna vrednost vpliva na konstrukcijo  $S_d$  je v splošnem dosežena, če izvedemo oziroma upoštevamo naslednje kombinacije obtežb:

$$\square S_d = S(\gamma_G G_C, \gamma_Q Q_{C1}, \psi_2 \gamma_Q Q_{C2}, \psi_m \gamma_Q Q_{Cn}),$$

kjer je:

- $n$  – število spremenljivih obtežb
- $Q_d = \gamma_Q Q_{C1}$  – je projektna vrednost glavne oziroma dominantne spremenljive obtežbe
- $\psi_{mj}$  – kombinacijski faktor za ostale spremenljive obtežbe  $j$ .

Projektna vrednost za trdnostne parametre je definirana kot:

$$\square m_d = \eta \frac{m_C}{\gamma_m},$$

kjer je:

- $\gamma_m$  – delni varnostni faktor za material
- $m_C$  – karakteristična vrednost materialne lastnosti – karakteristična trdnost je običajno določena s 5. centilom
- $\eta$  – prestopni faktor – faktor konverzacije, ki upošteva razliko med pogoji na dejanski konstrukciji in pogoji, ko se materialu določa karakteristično vrednost. To vključuje trajanje obtežbe, merilo, vpliv vlage in temperature in podobno. Projektna vrednost za odpornost  $m_d$  je dobljena z uporabo projektnih vrednosti za materialne in geometrijske parametre.

## 4 ANALIZA RAČUNSKIH PRIMEROV Z RAČUNALNIŠKIM PROGRAMOM CodeCal

### 4.1 Uvod

Moderni konstrukcijski standardi (Evrokodi) zagotavljajo preprost, ekonomičen in varen način projektiranja gradbenih objektov. Navadno konstrukcijski standardi temeljijo na projektnih enačbah, ki omogočajo enostavno preverjanje zanesljivosti izbrane konstrukcije. Preverjanje zanesljivosti konstrukcije se na enostaven način izvede s primerjavo odpornosti in obtežbe oziroma njenih učinkov. Zaradi dejstva, da tako obtežbe kot odpornosti dosegajo slučajne vrednosti, so v projektno enačbo vpeljane projektne vrednosti za obtežbe in odpornosti, saj se na tak način najlažje zagotovi ustrezen nivo zanesljivosti. Projektne vrednosti za obtežbe in odpornosti so dobljene kot faktorji karakterističnih vrednosti obtežb oziroma odpornosti ter delnih varnostnih faktorjev, ki so navadno večji od 1. Za pravilno upoštevanje učinka večjega števila obtežb so vpeljani kombinacijski faktorji, ki so navadno manjši od 1. Z verjetnostnimi metodami se lahko oblikuje standard, ki zajema projektno enačbo, delne varnostne faktorje, karakteristične vrednosti obtežb in odpornosti materialov, da se zagotovi tak nivo zanesljivosti vseh gradbenih konstrukcij, ki je homogen in neodvisen od izbranega materiala, obtežb ter drugih tehnoloških in naravnih pogojev. Ta postopek, vključno z želenim nivojem zanesljivosti – ciljni nivo zanesljivosti, se imenuje kalibracija standardov. Za enostavno kalibracijo varnostnih faktorjev ter nivoja zanesljivosti je možno uporabiti računalniški program CodeCal, ki temelji na analizah konstrukcijske zanesljivosti oziroma na verjetnostnih metodah prvega reda (Metoda prvega reda drugega momenta) ter na metodi delnih varnostnih faktorjev za obtežbo in odpornost (LRFD), ki je uporabljen pri Evrokodih. Ob pogoju, da je določena projektna enačba in potrebne osnovne slučajne spremenljivke, CodeCal za izbrane delne varnostne faktorje določi indekse zanesljivosti. Z uporabo računalniškega programa CodeCal je možno določiti tudi delne varnostne faktorje za izbran ciljni nivo zanesljivosti. CodeCal je uporaben za različne projektne situacije in različne materiale. CodeCal tako obravnava DS1-B-M1, DS1-B-M2/3, DS1-B-M1/2/3, DS2-O-M1/2/3, DS2-B-M1/2/3, DS2-O-M1/2/3 projektne situacije, pri čemer

- DS1 pomeni, da je obravnavana ena obtežna kombinacija
- DS2 pomeni, da sta obravnavani dve obtežni kombinacija

- B pomeni, da so izračunani indeksi zanesljivosti
- O pomeni, da so optimizirani delni varnostni faktorji
- M1 pomeni, da je v projektni situaciji obravnavan en material
- M2/3 pomeni, da so v projektni situaciji obravnavani dva ali trije materiali
- M1/2/3 pomeni, da so v projektni situaciji obravnavani en, dva ali trije materiali.

## 4.2 Računski primer

Za računski primer sem izbral enostaven lesen prostoležeč nosilec. Izbral sem trdnostni razred lesa – C30. Poleg stalne obtežbe je na izbrano konstrukcijo delovala obtežba snega in obtežba vetra. Po priporočilih SIST EN 338:1995 sem predpostavil tri projektne kombinacije:

- $F_d = \gamma_g F_{gk}$   $\gamma_g = 1.35$  projektna situacija *P*
- $F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_q F_{sk}$   $\gamma_g = 1.35; \gamma_q = 1.5$  projektna situacija *M*
- $F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_q (\psi_1 F_{sk} + \psi_2 F_{wk})$   $\gamma_g = 1.35; \gamma_q = 1.5$  projektna situacija *S*

Po priporočilih SIST EN338:1995 lahko za kombinacijska delna varnostna faktorja predpišemo verjetnost, da bosta oba vpliva istočasno vplivala na konstrukcijo z maksimalnimi vrednostmi;  $\psi_1 = \psi_2 = 0.9$ . Ko upoštevam to predpostavko lahko projektno situacijo *S* zapišem kot:

- $F_d = \gamma_g (F_{gk} + F_{sk} + F_{wk})$   $\gamma_g = 1.35$  projektna situacija *S*
- Za prevladujočo projektno obtežno kombinacijo pa po priporočilih izbiram med projektno situacijo *S* in projektno situacijo *M*, s kriterijem za *notranje sile* –  $S_d$  :
- $\frac{S_d^M}{S_d^S} > \frac{k_{\text{mod}}^M}{k_{\text{mod}}^S}$
- Če zgornji kriterij velja, potem izberemo projektna situacija *M*. V nasprotnem primeru velja projektna situacija *S*.

#### 4.2.1 Postopek dimenzioniranja po mejnem stanju nosilnosti

Za dimenzioniranje sem izbral 6m dolg prostoležeč nosilec, ki je del ravne lesene strehe, s prečnim prerezom  $b/h = 18/22$  cm. Vpliv stalne obtežbe je sestavljene iz obtežbe kritine, letev ter špirovcev. Vpliv obtežbe snega sem določil po standardu SIST EN 1991-1-3: 2004. Vpliv obtežbe vetra pa sem določil po standardu SIST ENV 1991-2-4. Prostoležeči nosilci so med seboj oddaljeni 1m. Na podlagi izbranih dimenzij, obtežbe in kvalitete materiala sem določil notranje statične količine konstrukcije.

Vpliv stalne obtežbe:

- $g_k = 0.45 \text{ kN/m}^2 \cdot 1\text{m} = 0.45 \text{ kN/m}$

Vpliv snega:

- $s = \mu_i C_e C_t s_k = 1.84 \text{ kN/m}^2 \cdot 1\text{m} = 1.84 \text{ kN/m}$

$\mu_i = 0.8$  koeficient oblike, ki je odvisen od naklona strehe

$C_e = 1.0$  koeficient izpostavljenosti objekta

$C_t = 1.0$  koeficient vpliva temperature

$s_k = 2.3 \text{ kN/m}^2$  karakteristična obtežba snega

Vpliv vetra:

- $W = W_e + W_i$

$W$  vpliv vetra

$W_i$  notranji vpliv vetra (pritisk, srk)

- $W_i = q_{ref} C_{e(Z)} C_{pi}$

- $C_{pi}$  koeficient notranjega pritiska vetra

- $C_{pi} = -0.8$  pritisk

- $C_{pi} = 0.5$  srk

$W_e$  zunanji vpliv vetra (pritisk, srk)

- $W_e = q_{ref} C_{e(Z)} C_{pe}$



- $q_{ref} = \frac{\rho}{2} v_{ref}^2 = 0.39 \text{ kN/m}^2$  srednja vrednost pritiska vetra

Srednja vrednost pritiska vetra je odvisna od gostote zraka  $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$  ter referenčne hitrosti vetra  $v_{ref} = 25 \text{ m/s}$ , ki je odvisna lokacije objekta (SIST EN 1991-2-4:1998).

- $C_{e(z)}$  faktor izpostavljenosti

Faktor izpostavljenosti  $C_{e(z)}$  je odvisen od višine obravnavanega objekta in od obravnavane cone (lokacija).

- $C_{pe}$  koeficient zunanega pritiska vetra

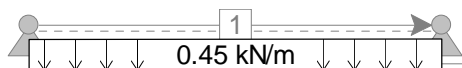
Koeficient zunanega pritiska vetra  $C_{pe}$  je odvisen od naklona strehe ter od smeri vetra.

Preveril sem naslednje obtežne primere:

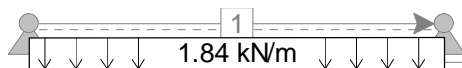
1.  $M$  :  $q_d = 1.35g_k + 1.5s_k$  stalna obtežba in obtežba snega
2.  $S_1$  :  $q_d = 1.35(q_{gk} + q_{sk} + q_{wk1})$  smer vetra glede na položaj strehe  $\theta = 0^\circ$
3.  $S_2$  :  $q_d = 1.35(q_{gk} + q_{sk} + q_{wk2})$  smer vetra glede na položaj strehe  $\theta = 180^\circ$
4.  $S_3$  :  $q_d = 1.35(q_{gk} + q_{sk} + q_{wk3})$  smer vetra glede na položaj strehe  $\theta = 90^\circ$

Prikaz posameznih obtežb na strešni nosilec v programu AMSES Frame2D:

Karakteristična stalna obtežba:



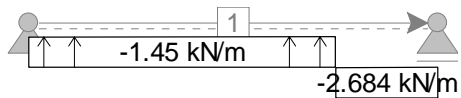
Karakteristična obtežba snega:



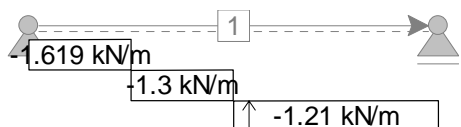
Karakteristična obtežba vetra  $\theta = 0^\circ$ :



Karakteristična obtežba vetra  $\theta = 180^\circ$  :



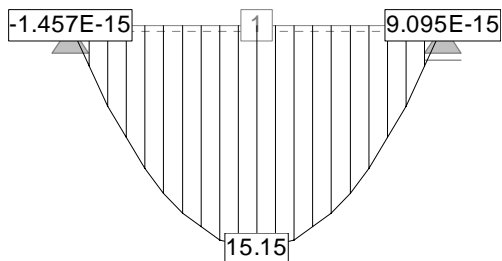
Karakteristična obtežba vetra  $\theta = 90^\circ$  :



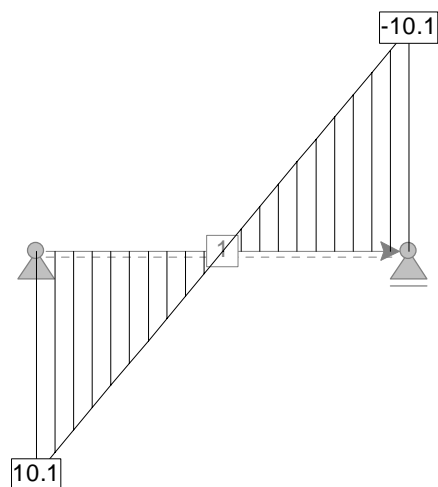
Notranje sile po *projektnih situacijah* :

1. Projektna situacija *M* :

Moment:

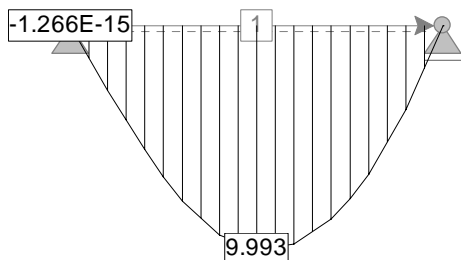


Prečna sila:

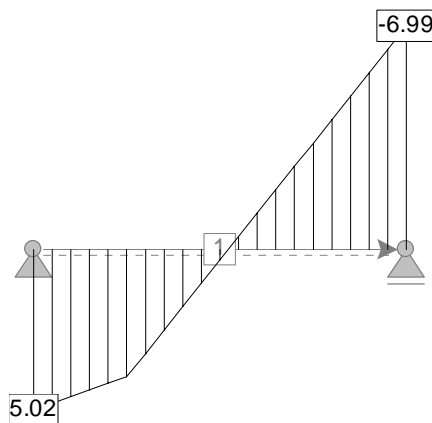


2. Projektna situacija  $S_1$  :

Moment:

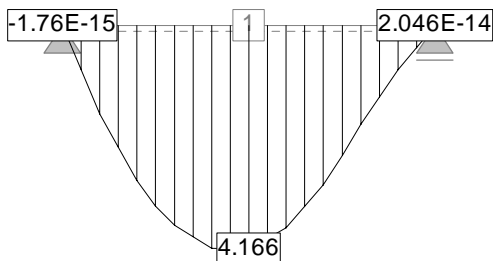


Prečna sila:

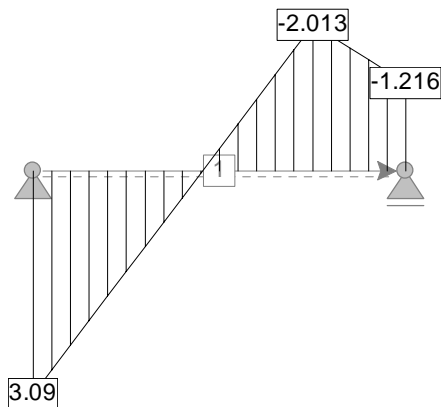


3. Projektna situacija  $S_2$  :

Moment:

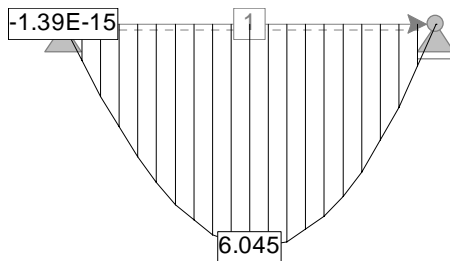


Prečna sila:

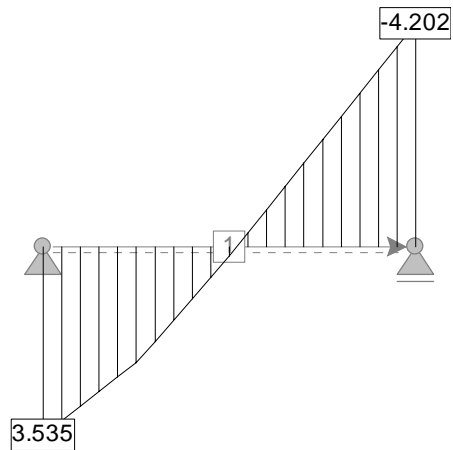


4. Projektna situacija  $S_3$  :

Moment:



Prečna sila:



Ob upoštevanju pravila:

$$\square \frac{S_d^M}{S_d^{S_n}} > \frac{k_{\text{mod}}^M}{k_{\text{mod}}^S},$$

pri čemer  $S_d^M$  predstavlja notranje sile pri projektni situaciji  $M$ ,  $S_d^{S_n}$  predstavlja notranje sile pri projektnih situacijah  $S_d^{S_n}$ ,  $n = 1, 2, 3$ .

- $k_{\text{mod}}^M = 0.8$
- $k_{\text{mod}}^S = 0.9$

izberem projektno situacijo  $M$  :

- $q_d = 1.35g_k + 1.5s_k$
- $M_d^M = 15.15 \text{ kNm}$ ,  $V_d^M = 10.1 \text{ kN}$

Geometrijske karakteristike prečnega prereza:

$$\square W = \frac{bh^2}{6} = 1452 \text{ cm}^3$$

Iz tabele Trdnostni razredi – karakteristične in računske vrednosti, ki jo priporoča SIST EN 338:1995, sem glede na izbrano projektno situacijo  $M$  in izbran trdnostni razred določil upogibno in strižno odpornost lesa:

- $f_{md} = k_{\text{mod}}^M \frac{f_{m,k}}{\gamma_m} = 0.8 \frac{3.0}{1.3} = 1.846 \text{ kN/cm}^2$ ,
- $f_{vd} = k_{\text{mod}}^M \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} = 0.8 \frac{0.3}{1.3} = 0.185 \text{ kN/cm}^2$ .

Za dimenzioniranje sem uporabil enačbo za enoosni upogib:

- $\sigma_{md} < f_{md}$ , , pri čemer je  $\sigma_{md} = \frac{M_d^M}{W} = 1.043 \text{ kN/cm}^2$ ,

Preveril sem tudi strižno odpornost materiala:

- $\tau_{vd} < f_{vd}$ , , pri čemer je  $\tau_{vd} = \frac{V_d^M}{b h} = 0.03 \text{ kN/cm}^2$ ,

#### 4.2.2 Preverjanje pomikov pri mejnem stanju uporabnosti

Trenutni pomik zaradi stalne obtežbe:

$$u_{1,inst.} = \frac{5 q_k l^4}{384 E_{0,mean} I} = 0.39 \text{ cm} \quad g_k = 0.45 \text{ kN/m}$$

Trenutni pomik zaradi obtežbe snega:

$$u_{2,inst.} = \frac{5 s_k l^4}{384 E_{0,mean} I} = 1.62 \text{ cm} \quad s_k = 1.84 \text{ kN/m}$$

- $I = \frac{b h^3}{12} = 15972 \text{ cm}^4$
- $E_{0,mean} = 1200 \text{ kN/cm}^2$

Skupni trenutni pomik:

$$u_{inst.} = u_{1,inst.} + u_{2,inst.} = 2.01 \text{ cm} \leq \frac{l}{300} = 2 \text{ cm}$$

Končni pomik zaradi stalne obtežbe:

$$u_{1,fin.} = u_{1,inst.} (1 + k_{def}) = 0.702 \text{ cm} \quad k_{def} = 0.8$$

Končni pomik zaradi obtežbe snega:

$$u_2 = u_{2,inst.} (1 + k_{def}) = 2.025 \text{ cm} \quad k_{def} = 0.25$$

Skupni končni pomik:

$$u_{net,fin} = u_{1,fin.} + u_{2,fin.} = 2.727 \leq \frac{l}{200} = 3 \text{ cm} \quad k_{def} = 0.8$$

Izbrane dimenzije prečnega prereza in izbrane materialne karakteristike lesa izpolnjujejo pogoje mejnega stanja nosilnosti in mejnega stanja uporabnosti po Evrocodu 5.

#### 4.2.3 Uporaba računalniškega programa na konkretnem izračunanem primeru

Za izračunani računski primer sem ob upoštevanju priporočenih porazdelitev obtežb in materiala ter predpisanih varnostnih faktorjev z računalniškim programom CodeCal, ki upošteva funkcijo mejnega stanja  $g$ , določil indeks zanesljivosti  $\beta$ :

$$g = \frac{k_{\text{mod}} f_{0.05}}{\gamma_M} - (1 - \alpha) \gamma_G \sigma_k - \alpha \gamma_Q \sigma_k \geq 0 \quad \text{funkcija mejnega stanja, pri čemer } \alpha \text{ predstavlja}$$

koeficient med prevladujočo spremenljivo in celotno obtežbo.

	Porazdelitev	COV (%)	Centil (%)	Vrednost
$\sigma_{gk}$	normalna	5	50	
$\sigma_{qk}$	Gumblova	40	98	
$f_{0.05}$	lognormalna	20	5	
$\gamma_g$				1.35
$\gamma_q$				1.5
$\alpha$				0.2, 0.5, 0.8
$R_k$	lognormalna	15	5	
$\gamma_m$				1.3
$k_{\text{mod}}$				1.0, 0.8
Nezanesljivost modela – $\xi_1$	normalna		5	

Preglednica 3: Priporočene stohastične lastnosti obtežb in materiala

Transformacija uporabljenih podatkov:

1. Stalna (lastna) obtežba:

- normalna porazdelitev
- $g_k = 0.45$  kN/m
- $V_g = 0.05$
- $F(g_k) = 0.50$
- $m_g = E[G] = g_k = 0.45$  kN/m
- $\sigma_g = D[G] = m_g V_g = 0.0225$  kN/m

2. Spremenljiva obtežba – sneg:

- Gumbelova porazdelitev
- $s_{k,0.98} = Q_1 = 1.84$  kN/m
- $V_s = V_{Q_1} = 0.4$
- $F(s_k) = F(Q_1) = 0.98$
- $\alpha = \frac{1.28255 + 3.32472 V_s}{s_{k,0.98} V_s} = 3.54951$  m/kN
- $u = \frac{s_{k,0.98} (1.11201 - 0.500462 V_s)}{1.11201 + 2.88263 V_s} = 0.74071$  kN/m
- $\gamma = 0.577216$
- $V_s = \frac{\sigma_s}{m_s} = \frac{\pi}{\sqrt{6}\alpha} \frac{1}{u + \frac{\gamma}{\alpha}} = 0.40 \quad \Rightarrow \quad m_s = u + \frac{\gamma}{\alpha} = 0.90332$  kN/m
- $\sigma_s = \frac{\pi}{\sqrt{6}\alpha} = 0.36133$  kN/m



### 3. Upogibna trdnost:

- lognormalna porazdelitev
- $f_{m,k} = f_{0,05} = 3.0 \text{ kN/cm}^2 = 30000 \text{ kN/m}^2$
- $V_F = 0.2$
- $F(f_{m,k}) = 0.05$
- $\sigma_{\ln F} = \sqrt{\ln(V_F^2 + 1)} = 0.198042$
- $\tilde{m}_F = f_{0,05} \exp(-\sigma_{\ln F} F_U^{-1}(0,05)) = 41552.09 \text{ kN/m}^2$
- $m_F = \tilde{m}_F \exp\left(\frac{\sigma_{\ln F}^2}{2}\right) = 42374.98 \text{ kN/m}^2$
- $\sigma_F = m_F * V_F = 8475 \text{ kN/m}^2$

#### 4.2.4 Izbira indeksa zanesljivosti

Za moj računski primer sem izbral primer, ko so relativni stroški stopnje varnosti normalni ob zmernih posledicah porušitve  $\beta = 4.2$  ( $P_f \approx 10^{-5}$ ).

Opis postopka vnosa podatkov v računalniški program CodeCal:

Pri vnosu podatkov v računalniški program CodeCal sem upošteval enostaven računski primer, ki sem ga izračunal in dimenzioniral po Mejnem stanju nosilnosti po priporočilih Eurocoda 5. Izbral sem projektno situacijo  $M$ , ki se v CodeCalu imenuje DS1-B-M1 in vključuje izračun projektne situacije sestavljene iz stalne obtežbe, prevladujoče spremenljive obtežbe in enega materiala. Za izračun zanesljivosti omenjene konstrukcije CodeCal uporablja projektno enačbo:

$$\bullet \quad z = \frac{\gamma_m}{R_k} (\alpha \gamma_g G_k + (1 - \alpha) \gamma_q Q_k)$$

ter funkcijo mejnega stanja

$$\bullet \quad g(X) = zR\xi - \alpha G - (1 - \alpha) Q \leq 0.$$

V nadaljevanju sem vnesel podatke za:

- stohastični model odpornosti lesa
- stohastični model za nezanesljivost izbranega računskega modela
- stohastični model za stalno (lastno) obtežbo
- stohastični model za spremenljivo (sneg) obtežbo.

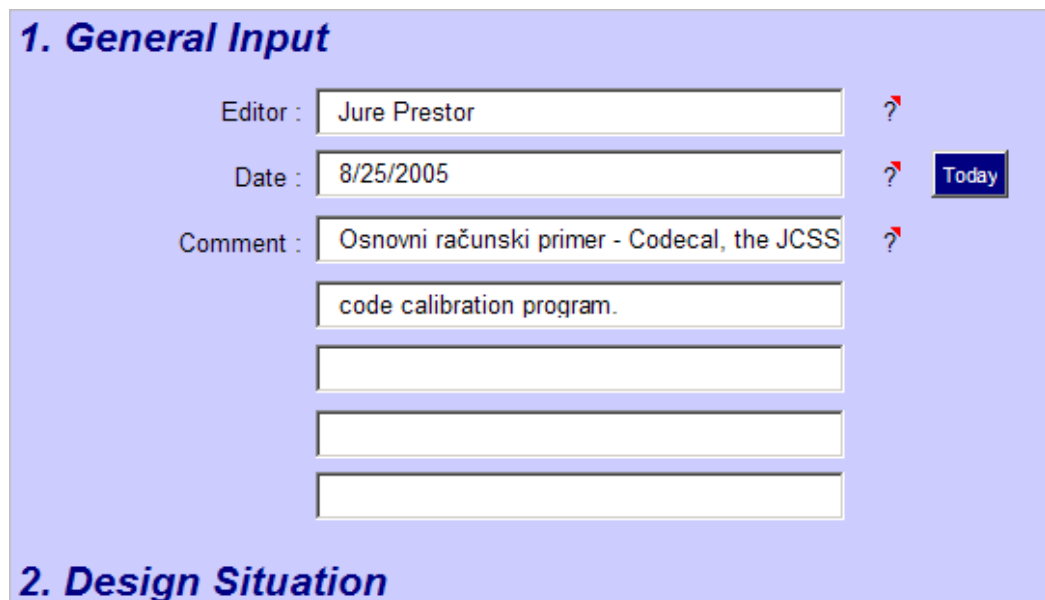
Pri vnosu karakteristik odpornosti lesa ter omenjenih obtežb sem upošteval transformirane vrednosti.

V program sem vnesel tudi delne varnostne faktorje po priporočilih Eurocada 5:

- $\gamma_{mRI} = 1.3$
- $\gamma_G = 1.35$
- $\gamma_Q = 1.5$

ter izbral ciljni indeks zanesljivosti  $\beta_t = 4.2$ , kar ustreza približni vrednosti verjetnosti porušitve  $P_f \approx 10^{-5}$ .

#### 4.2.5 Vhodni podatki



**1. General Input**

Editor :  ?

Date :  ?

Comment :  ?

**2. Design Situation**

Vhodno okno, kjer vpišemo podatke uporabnika, datum izvajanja kalibracije ter komentar.

### Design Situation 1: One Variable Load

#### Design Equation

$$z = \frac{\gamma_m}{R_k} (\alpha \gamma_G G_k + (1-\alpha) \gamma_Q Q_k)$$

#### Limit State Function

$$g(\mathbf{X}) = z R_k - \alpha G_k - (1-\alpha) Q_k \leq 0$$

 Design Situation 1: One Variable Load

Vhodno okno, kjer sta prikazani projektna enačba in funkcija mejnega stanja.

**Resistance  $R_1$**

Material :	<input type="text" value="Timber, etc."/>	?
Distribution Type :	<input type="text" value="Lognormal"/>	?
$E[R_1] =$	<input type="text" value="42374,98"/>	?
$D[R_1] =$	<input type="text" value="8475"/>	?
$F[R_{1k}] =$	<input type="text" value="5"/> %	?

Vhodno okno, kjer je vpisana izbrana vrsta materiala ter njene stohastične karakteristike.

**Model Uncertainty**  $\xi_1$

Distribution Type :  ?

E[ $\xi_1$ ] =  ?

D[ $\xi_1$ ] =  ?

Vhodno okno, ki zajame nezanesljivost izbranega računskega modela.

**Dead Load**  $G$

Distribution Type :  ?

E[G] =  ?

D[G] =  ?

F[G<sub>k</sub>] =  % ?

Vhodno okno, kjer je vpisan stalni vpliv – obtežba ter njene stohastične karakteristike.

**4. Stochastic Model for Variable Load(s)**

**1st Variable Load**  $Q_1$

Comment :  ?

Distribution Type :  ?

E[ $Q_1$ ] =  ?

D[ $Q_1$ ] =  ?

F[ $Q_{k1}$ ] =  % ?

Vhodno okno, kjer je vpisan spremenljivi vpliv – obtežba ter njene stohastične karakteristike.

### 5. Partial Safety Factors and Load Combination Factors

**Resistance**

$\gamma_{mR1} =$   ?

**Dead Load**

$\gamma_G =$   ?

**Leading Variable Load**

$\gamma_Q =$   ?

Vhodno okno, kjer so vpisani priporočeni delni varnostni faktorji za izbran material ter predvidene vplive - obtežbe.

**Optimization parameters**

$$\text{Min} \sum w_{\beta_i} (\beta_{\beta_i} - \beta_{\text{target}})^2$$

$w_{\beta_i} = w_R, w_Q$  ?

$\beta_{\text{target}} =$   ?

**Factors to be optimized :**

- $\gamma_{mR}, \gamma_G, \gamma_Q, \psi_{01}, \psi_{02}$
- $\gamma_{mR}, \gamma_G, \psi_{01}, \psi_{02}$
- $\gamma_{mR}, \gamma_G, \gamma_Q$
- $\gamma_{mR}, \gamma_Q$
- $\gamma_m$

**Important Note:**  
 Parameters within this frame have to be specified for optimization only.

**Materials: Weights & partial safety factors:**

$R_1$		
$R_1 \ \& \ R_2$	<input type="text" value="0.5"/>	<input type="text" value="0.5"/>
$R_1, R_2 \ \& \ R_3$	<input type="text" value="0.33"/>	<input type="text" value="0.33"/>
	$w_{R1}$	$w_{R2}$
	$w_{R3}$	

Vhodno okno, kjer je vpisan izbran indeks zanesljivosti  $\beta$

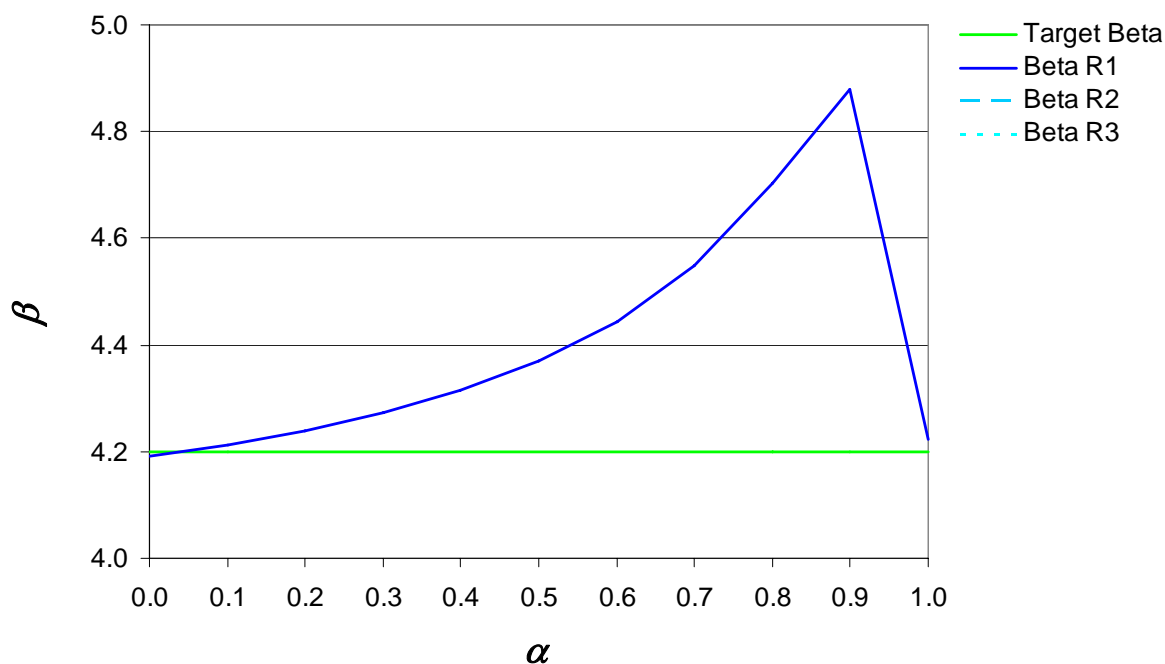
Optimization options:			
S =	<input type="text" value="1"/>	N =	<input type="text" value="3"/>
FTOL =	<input type="text" value="1"/>	MAXFCN =	<input type="text" value="500"/>
		No. Material =	<input type="text" value="1"/>

Vhodno okno, kjer so vpisani parametri optimizacije

#### 4.2.6 Rezultati izhodiščnega računskega modela

		$\beta_{R1}$	$\beta_{R2}$	$\beta_{R3}$	$\beta_{target}$	$w_{ij} (\Delta\beta_{ij})^2$	$w_i$
$\alpha$	0.0	4.19			4.20	0.0001	1.00
	0.1	4.21			4.20	0.0002	1.00
	0.2	4.24			4.20	0.0016	1.00
	0.3	4.27			4.20	0.0053	1.00
	0.4	4.31			4.20	0.0130	1.00
	0.5	4.37			4.20	0.0285	1.00
	0.6	4.44			4.20	0.0591	1.00
	0.7	4.55			4.20	0.1215	1.00
	0.8	4.70			4.20	0.2541	1.00
	0.9	4.88			4.20	0.4597	1.00
	1.0	4.22			4.20	0.0005	1.00
	$\beta_{max} =$	4.88					
	$\beta_{min} =$	4.19					
	$Pf_{max} =$	1.4E-05					
	$Pf_{min} =$	5.4E-07					
	$\Sigma =$					0.94	11.00

Izhodno okno, kjer so prikazani izračunani indeksi zanesljivosti  $\beta$  za različna razmerja  $\alpha$



Izhodno okno, kjer so za neoptimiziran osnovni računski primer grafično prikazani indeksi zanesljivosti  $\beta$  za različna razmerja  $\alpha$

#### 4.2.7 Ukrepi in rezultati izboljšanja izhodiščnega računskega modela

Opcije optimizacije:

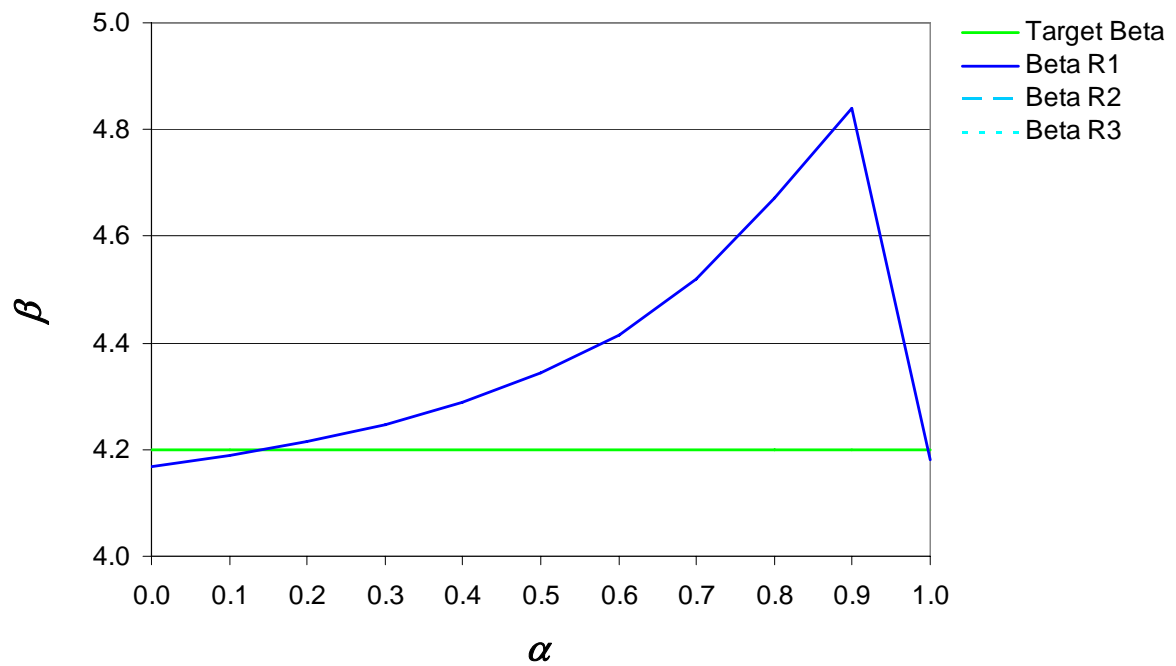
Optimization options:			
S =	1	N =	3
FTOL =	0.001	MAXFCN =	10000
		No. Material =	1

		$\beta_{R1}$	$\beta_{R2}$	$\beta_{R3}$	$\beta_{target}$	$w_{ij} (\Delta\beta_{ij})^2$	$w_i$
$\alpha$	0.0	4.17			4.20	0.0431	40.00
	0.1	4.19			4.20	0.0001	1.00
	0.2	4.22			4.20	0.0002	1.00
	0.3	4.25			4.20	0.0023	1.00
	0.4	4.29			4.20	0.0079	1.00
	0.5	4.34			4.20	0.0204	1.00
	0.6	4.42			4.20	0.0466	1.00
	0.7	4.52			4.20	0.1024	1.00
	0.8	4.67			4.20	0.2237	1.00
	0.9	4.84			4.20	0.4104	1.00
	1.0	4.18			4.20	0.0152	40.00
	$\beta_{max} =$	4.84					
	$\beta_{min} =$	4.17					
	$Pf_{max} =$	1.5E-05					
	$Pf_{min} =$	6.5E-07					
	$\Sigma =$					0.87	89.00

Currently applied values:	
$\gamma_{mR1} =$	1.05
$\gamma_{mR2} =$	
$\gamma_{mR3} =$	
$\gamma_G =$	1.65
$\gamma_Q =$	1.84
$\Sigma w_{ij} (\Delta\beta_{ij})^2 =$	0.87217
$\beta_{target} =$	4.20
$P_{f,target} =$	1.3E-05

Novi optimizirani delni varnostni faktorji za konkreten računski primer in za izbran indeks zanesljivosti  $\beta$





Izhodno okno, kjer so za optimiziran osnovni računski primer grafično prikazani indeksi zanesljivosti  $\beta$  za različna razmerja  $\alpha$

Komentar:

Iz osnovnega primera je očitno, da je z uporabo delnih varnostnih faktorjev po priporočilih Evrokoda izpolnjen pogoj zanesljivosti za vsa razmerja  $\alpha$ .

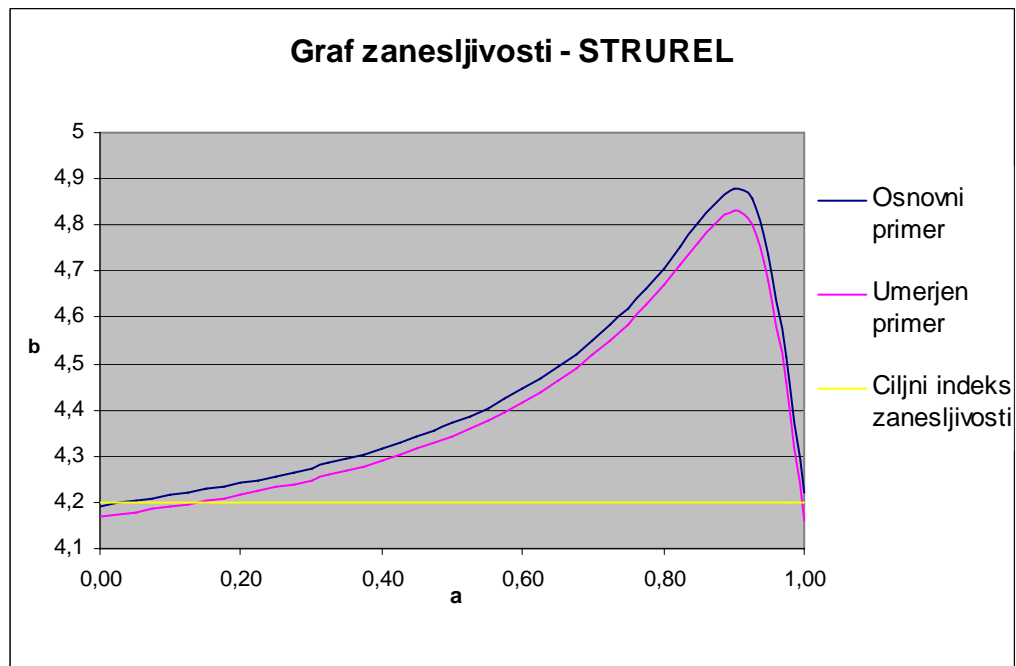
Kot rezultat kalibracije so novi delni varnostni faktorji, ki povzročijo majhen vertikalni zamik grafa pri vseh razmerjih  $\alpha$  s tem pa so tudi znižane vrednosti indeksa zanesljivosti  $\beta$ .

Za optimizacijo delnih varnostnih faktorjev osnovnega primera sem v programu CodeCal s spreminjanjem uteži obtežbe  $w_i$  pri razmerjih  $\alpha = 0.0$  ter  $\alpha = 1.0$  skušal pomanjšati vsoto razlik  $w_{ij}(\Delta\beta_{ij})^2$  med optimiziranimi indeksi zanesljivosti  $\beta_{R1}$  ter med ciljnim indeksom zanesljivosti  $\beta_{target}$ . Ostale spremembe uteži obtežbe  $w_i$  pri drugih razmerjih  $\alpha$  bi zmanjšale le vsoto razlik  $w_{ij}(\Delta\beta_{ij})^2$ , medtem ko pa bistveno ne bi vplivale na zanesljivost konstrukcije. Spremenil sem tudi opcije optimizacije, saj sem povečal največjo dovoljeno število ponovitev iteracij MAXFCN ter pomanjšal dopustno vrednost med posameznimi iteracijami FTOL.

Na ta način sem izračunal nove delne varnostne faktorje, ki bistveno ne spremenijo zanesljivost konkretne konstrukcije.

Izkaže se, da so delni varnostni faktorji po priporočilih Evrokoda za konkreten primer konstrukcije primerno izbrani.

Rezultati kalibracije delnih varnostnih faktorjev, ki sem jih dobil z uporabo računalniškega programa CodeCal, so bili preverjeni z računalniškim programom STRUREL (Strurel, Reliability consulting programs GmbH, Federal Republic of German).



Izhodno okno, kjer so z računalniškim programom STRUREL prikazani rezultati indeksov zanesljivosti  $\beta$  za osnovni in optimiziran primer za različna razmerja  $\alpha$

## 5 ZAKLJUČEK

Na začetku izdelovanja diplomske naloge sem najprej spoznal matematične postopke, ki predstavljajo temeljno orodje za racionalno uporabo pridobljenih podatkov v gradbeni stroki. Ti podatki predstavljajo lastnosti konstrukcijskih sistemov, lastnosti materialov, lastnosti vseh vplivov na gradbene konstrukcije, vključne z vsemi stohastičnimi nedoločljivostmi. Cilj diplomskega dela je bil spoznati ozadje določanja vrednosti varnostnih faktorjev, ki se uporabljajo v gradbeni praksi. Tako sem spoznal kalibracijo delnih varnostnih faktorjev ter pogoje za njihovo uporabo. Podrobno sem opisal optimizacijo delnih varnostnih faktorjev, ki temelji na metodi prvega reda – drugega momenta.

Po priporočilih Evrokoda sem preveril dimenzije konkretne lesene konstrukcije. Z računalniškim programom CodeCal sem za konkreten lesen konstrukcijski sistem preveril nivo zanesljivosti. V nadaljevanju sem ob istem nivoju zanesljivosti poskušal z uporabo računalniškega programa Codecal predlagati nove optimizirane delne varnostne faktorje za material in obtežbe. Dobljeni rezultat so bili preverjeni še z računalniškim programom STRUREL.

Problematika diplomske naloge mi je preko teoretične podlage ter praktičnega primera omogočila pogled v strukturo in izdelovanje standardov, ki se ves čas spreminjajo ob novih dognanjih stroke in tehnologij v globalnem svetovnem prostoru.

## 6 VIRI

Turk, G., Analiza zanesljivosti konstrukcij z upoštevanjem geometrijske in materialne nelinearnosti, Doktorsko delo, Univerza v Ljubljani, FGG, 1994, <http://www.fgg.uni-lj.si>

Faber, M. H., Sørensen, J. D., Reliability Based Code Calibration, Paper for the JCSS, 2002, <http://www.jcss.ethz.ch>.

Ranta-Manus A., Torratti T., Target safety level of timber structures, COST E24 Workshop in COMO, 2002

Madsen H. O., Krenk, S., Lind, N. C., Methods of Structural Safety, 1986

Sørensen J. D., Code Calibration and Timber Experience, Aalborg University Sohngaardsholmsvej 57, DK-9000 Aalborg Denmark, 2001

Torratti, T., Turk, G., Reliability analysis of glulam tapered beam, 2003

CodeCal, JCSS, 2003, <http://www.jcss.ethz.ch>.

Strurel, A structural Reliability Analysis Program system, COMREL and SYSREL Users Manual, RCP GmbH, 1999

AMSES Frame2D, <http://www.ainet.si>

SIST EN 1990:2004 – Evrokod – Osnove projektiranja, <http://www.sist.si>

SIST EN 1995-1-1:2004 – Evrokod 5: Projektiranje lesenih konstrukcij – 1. del: Splošna merila in pravila za stavbe, <http://www.sist.si>

SIST EN 1991-1-3:2004 – Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 3. del: Splošni vplivi – obtežba snega, <http://www.sist.si>

SIST EN 1991-2-4:1998 – Evrokod 1: Osnove projektiranja in vplivi na konstrukcije – Del 2-4: Vplivi na konstrukcije – obtežba vetra, <http://www.sist.si>

SIST EN 338:2004 – Konstrukcijski les, trdnostni razredi, <http://www.sist.si>