

# Stabilnost protiv izbočivanja limova u novoj regulativi

Drago Horvatić, Darija Živni

## Ključne riječi

Stabilnost lima, izbočivanje, efektivna širina, efektivna debljina, granična analiza, krivulje izbočivanja

D. Horvatić, D. Živni

Stručni rad

## Stabilnost protiv izbočivanja limova u novoj regulativi

U radu se prikazuje geneza nastanka prilično zakašnjelog Eurokoda3-dio 1.5 koji se odnosi na probleme ploča napreznih u svojoj ravnini. U tom je dokumentu značajan problem stabilnosti limova. Poslije testiranja prijedloga raznih autora, u probnoj normi ENV usvojena je nešto korigirana Winterova formula za konačnu normu EN. Uspoređuje se i sada važeća hrvatska norma HRN U.E7.121 koja je u primjeni još od 1986. Na jednostavnom numeričkom primjeru pokazana je primjena nove norme.

## Key words

plate stability, plate buckling, effective width, effective thickness, limit state analysis, plate buckling curves

D. Horvatić, D. Živni

Professional paper

## Stability to plate buckling in new regulations

Authors discuss the genesis of the quite belated Eurocode 3 - Part 1.5 in which problems of plates stressed in their own plane are regulated. A highly significant issue treated in the document is the problem of plate stability. After analysis of solutions presented by various authors at the presntandard stage (ENV), a somewhat corrected Winter's formula was adopted for the final standard (EN). This standard is compared to the current Croatian standard HRN U.E7.121 which has been in use since 1986. The application of the new standard is shown on a simple numerical example.

## Mots clés

Stabilité de la tôle, voilement, largeur effective, épaisseur effective, analyse aux états limites, courbes du voilement de la tôle

D. Horvatić, D. Živni

Ouvrage professionnel

## Stabilité des tôles au voilement dans la nouvelle réglementation

L'article présente la genèse de l'Eurocode 3, publié tardivement – partie 1.5, relative aux problèmes des dalles sollicitées sur leur plan. Le problème de la stabilité des tôles revêt une grande importance dans ce document. Après les essais des propositions de différents auteurs, la norme d'essai ENV a adopté la formule de Winter quelque peu corrigée pour la norme définitive EN. On compare aussi la norme croate en vigueur HRN U.E7.121, en application depuis 1986. Un exemple numérique simple démontre l'application de la nouvelle norme.

## Schlüsselworte:

Blechstabilität, Ausbeulung, effektive Breite, effektive Dicke, Grenzzustandanalyse, Ausbeulungskurven

D. Horvatić, D. Živni

Fachbericht

## Stabilität gegen die Ausbeulung von Blechen im neuen Regulativ

Im Artikel ist die Entstehung des ziemlich verspäteten Eurokoda3 – Abteilung 1.5. dargestellt, welches sich auf Probleme der in ihrer Ebene beanspruchten Platten bezieht. In diesem Dokument ist das Problem der Blechstabilität hervorragend. Nach dem Prüfen der Vorschläge verschiedener Autoren ist in der Probenorm ENV für die endgültige Norm EN die etwas korrigierte Formel von Winter angenommen. Verglichen wird auch die zur Zeit gültige kroatische Norm HRN U. E7 121 die noch seit 1986. in Anwendung ist. An einem einfachen Zahlenbeispiel ist die Anwendung der neuen Norm dargestellt.

Autori: Prof. dr. sc **Drago Horvatić**, dipl. ing. građ.; **Darija Živni**, , dipl. ing. građ., znanstveni novak, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu

## 1 Uvod

Dosad valjana norma u nas HRN U.E7.121 (Provjera stabilnosti nosivih čeličnih konstrukcija, proračun izbočivanja limova) [1] uvedena je u praksu 1986. godine kada se o uvođenju granične analize još raspravljalo. Taj se dokument oslanjao na prvi nacrt nove europske norme Eurocode 3 (1983.g.) i do onda dobro razrađene njemačke norme DIN 4114. Stoga je bila osnovna krivulja izbočivanja donekle izjednačena s vrlo restriktivnom normom DIN 4114 [9] uz faktor sigurnosti  $v_B = 1,71$ . Tu su se uzimala u obzir loša iskustva s nezgodama na problemu stabilnosti ukrućenih ploča na mostovima velikih raspona, koja su u svjetskim razmjerima inicirala opsežna istraživanja ovog problema. Danas je banka podataka s ovim istraživanjima znatno obogaćena, ali još uvijek nedovoljno jer je ostalo još toga nedorečeno. Razlog je tome dugo očekivana prednorma za stabilnost limova i ukrućenih ploča prihvaćena od europske komisije CEN tek 1997. godine i puštena u probnu primjenu s oznakom ENV 1993-1-5.[3]. Probna je primjena predviđena kroz najmanje 3 godine, s time da se u tom vremenu prikupe podaci iz prakse i istraživačkih centara s kojima bi se prednorma korigirala. Konverzija za ovu normu iz probnog izdanja ENV u trajnu verziju EN planirana je za kraj 2003. godine.

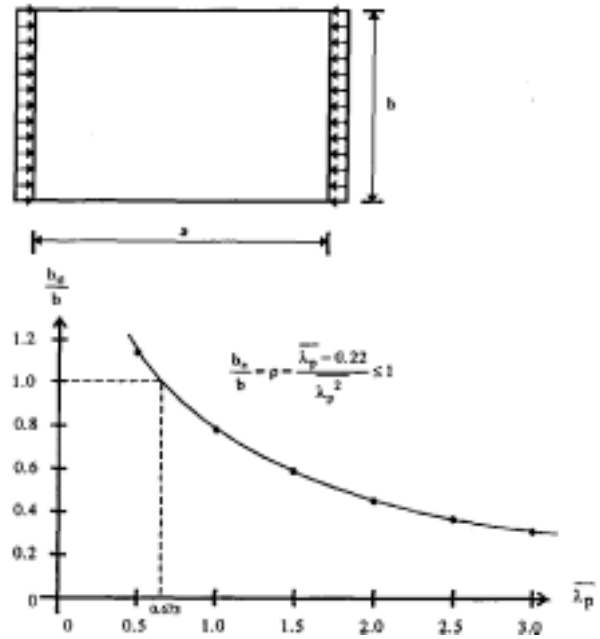
Državni zavod za normizaciju i mjeriteljstvo Republike Hrvatske odlučio je da se primjena norma s oznakom ENV pusti u opticaj u izvornom obliku na jednom od službenih jezika CEN (engleski, njemački, francuski) uz dodatak i komentar na hrvatskom jeziku, tako da se i na taj način približimo standardima Europske Unije. Podloge za ovu prednormu imaju svoju povijest pa se u nastavku prikazuje geneza rješavanja nekih od problema ovog posljednjeg prijedloga.

## 2 O razmatranom problemu

Granična analiza zahtijeva što bolje definiranje nosivosti s uzimanjem u obzir imperfekcija, a pri izbočivanju i relativno veliku postkritičnu rezervu. Oba parametra vezana su na eksperimentalno ispitivanje. Karman je već 1932. godine definirao proračunski model s efektivnom širinom i prema tom su modelu kasnije razrađivana rješenja za različite posebne slučajeve.

Veliki se broj autora uključio u istraživanje ovog problema. Među prvima je američki istraživač G. Winter, koji je predložio jedinstvenu krivulju odnosa izbočivanja - vitkost 1943. godine, da bi 1947. taj prijedlog prvi put ušao u regulativu [5].

U originalnoj verziji Winterova formula ima oblik primjene Karmanove efektivne širine ali korigirane s određenim brojem pokusa:



Slika 1. Osnovna Winterova krivulja prema izrazu (2) iz 1968. godine

$$\frac{b_e}{b} = \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_e}} \left( 1 - 0,25 \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_e}} \right) \quad (1)$$

Prevedeno na današnje oznake dobivamo uz:

$$\sigma_{cr} = k_\sigma \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{t}{b} \right)^2,$$

$$\sigma_e = f_y, \quad \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{f_y}} = \frac{1}{\lambda_p}$$

$$\frac{b_e}{b} = \rho = \frac{\lambda_p - 0,22}{\lambda_p^2} \leq 1 \quad (2)$$

Relativna se vitkost definira na dva načina:

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{b/t}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} \quad (3)$$

U navedenim izrazima simboli označuju:

$b$  - puna širina lima

$b_e$  - efektivna širina lima

$t$  - debljina lima

$\lambda_p$  - relativna vitkost lima

$\sigma_{cr}$  - kritični napon izbočivanja

$k_\sigma$  - koeficijent izbočivanja za odgovarajući odnos napona  $\psi = \sigma_2/\sigma_1$  ( $\sigma_2$  je manji napon i unosi se s

predznakom). Za ukrućenu pojasnu ploču  $k_\sigma$  se definira iz teorije ortotropne ploče.

$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$  ( $f_y$  u N/mm<sup>2</sup>) = usporedni faktor granice popuštanja.

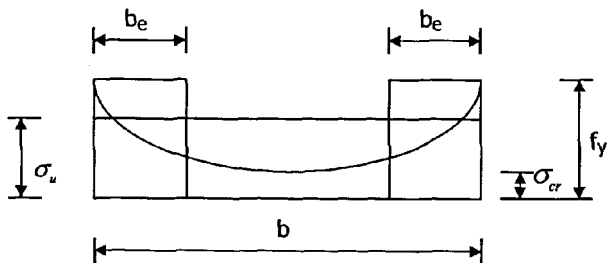
Konstanta 0,25 iz Winterove formule (1) zamijenjena je u američkim standardima 1968. godine sa 0,22, a takva je ušla i u današnju europsku prednormu ENV 1993-1-5.

Predložena je krivulja zadovoljavala rubne uvjete s jednoliko raspoređenim naponima na krajevima ploče prema slici 1. uz  $k_\sigma = 4,0$ .

Premda je utjecaj oblika naponskog dijagrama s odnosom  $\psi$  preko koeficijenta izbočivanja  $k_\sigma$  sadržan u relativnoj vitkosti lima, pokazalo se da to nije dovoljno pa su daljnji prijedlozi krivulja za izbočivanje još dodatno uzimali taj utjecaj.

### 3 Efektivne širine iz uvjeta izbočivanja

Kako je već spomenuto, imperfekcije i postkritična rezerva stvaraju relativno velike razlike u odnosu na proračunske modele prema linearnoj elastičnoj teoriji. Utjecaj imperfekcija je veći u području malih vitkosti, dok je utjecaj postkritične rezerve relativno velik u području većih vitkosti. Stoga su proračunski modeli koji se pojavljuju u literaturi prilično različiti za istu relativnu vitkost. U nastavku ćemo prikazati ove razlike vezane uz neke poznate autore iz literature. Opći model za definiranje naponskog stanja na izbočenoj ploči prikazan je na slici 2.



Slika 2. Proračunski model za izbočivanje ploče širine  $b$

Već spomenuti Karmanov model za efektivnu širinu daje odnos  $b_e \cdot f_y = b \cdot \sigma_u$  gdje je  $\sigma_u$  prosječni napon po širini  $b$  ili definirana nosivost s uzimanjem u obzir svih imperfekcija [4].

#### 3.1 Karmanova formula

Izvodi se iz postavke da je kritični napon  $\sigma_{cr}$  na širini  $b$  jednak graničnom naponu  $f_y$  na širini  $b_e$  (slika 2.). [6 i 7].

$$k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 = \sigma_{cr} \dots \dots k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b_e}\right)^2 = f_y$$

Dijeljenjem ovih jednačbi i prevedeno na današnje oznake dobivamo:

$$\frac{b_e}{b} = \frac{1}{\lambda_p} \quad (4)$$

#### 3.2 Linearna teorija izbočivanja [7]

Prema modelu na slici 2. izvodi se:

$$b_e f_y = 2 \int_0^{b/2} \sigma_x(y) dy \quad (5a)$$

Rješenjem dobivamo uz primjenu rubnih uvjeta za  $f_y$  i  $\sigma_{cr}$ :

$$\frac{b_e}{b} = \frac{1}{\lambda_p^2} \quad (5b)$$

#### 3.3 Winterova formula (1947.)

$$\frac{b_e}{b} = \frac{1}{\lambda_p} - \frac{0,25}{\lambda_p^2} \quad (6)$$

Konstanta 0,25 je utvrđena na nizu pokusa hladno oblikovanih profila, dok je za toplo valjane profile kasnije korigirana na 0,22.

#### 3.4 Švicarske norme (SIA-161, 1979. i 1990.) [4]

Problem maksimalno pojednostavljaju:

$$\frac{b_e}{b} = \frac{0,9}{\lambda_p} \leq 1 \quad (7)$$

#### 3.5 JUS odn.HRN U.E7.121(1986.)[1],[4]

Prijedlog prema prvom nacrtu eurokoda 3 s korekcijama postojeće njemačke norme DIN 4114.

$$\frac{b_e}{b} = \frac{0,60}{\sqrt{\lambda_p^2 - 0,13}} C_\sigma \rightarrow C_\sigma = 1,25 - 0,25\psi \leq 1,25 \quad (8)$$

#### 3.6 DIN 18800, Teil 3 (1990.) [8]

$$\frac{b_e}{b} = C \left( \frac{1}{\lambda_p} - \frac{0,22}{\lambda_p^2} \right) \rightarrow C = 1,25 - 0,12\psi \leq 1,25 \quad (9)$$

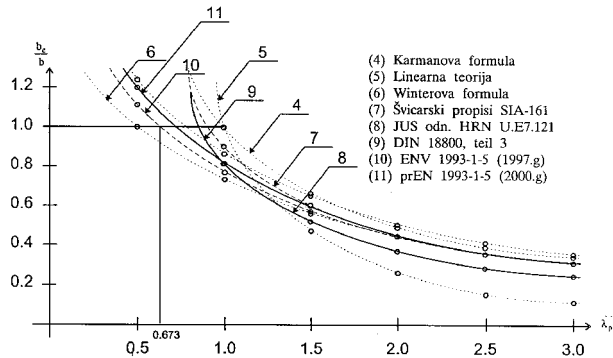
#### 3.7 ENV 1993-1-5 (1997.) [3]

$$\frac{b_e}{b} = \rho = \frac{1}{\lambda_p} - \frac{0,22}{\lambda_p^2} \rightarrow \alpha \lambda_p > 0,673 \quad (10)$$

#### 3.8 prEN 1993-1-5 (2000.) [8]

$$\frac{b_e}{b} = \rho = \frac{1}{\lambda_p} - \frac{0,05(3 + \psi)}{\lambda_p^2} \quad (11)$$

(prEN označuje prijedlog konačne verzije norme).

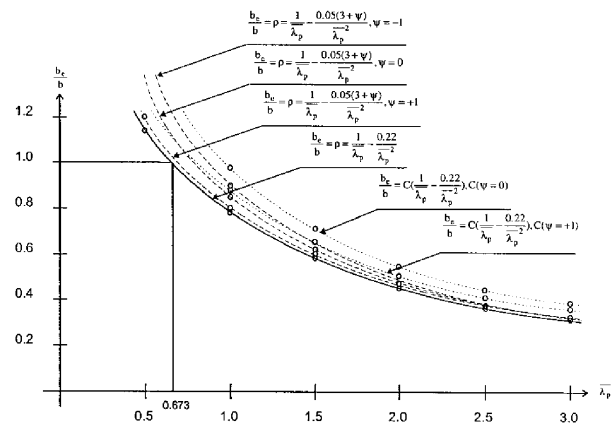


Slika 3. Efektivne širine u različitim verzijama

### 3.9 Usporedbe i komentari

Usvojene krivulje prikazane na slici 3. rezultat su eksperimentalnih istraživanja s uzimanjem u obzir imperfekcija i postkritične rezerve. Izuzetak je krivulja (5) koja uzima u obzir samo naponsko prelaganje na idealno ravnoj ploči. Treba uočiti da su karakteristična odstupanja pozitivna u duboko elastičnom području (veće vitkosti) u odnosu prema izbočivanjima u plastičnom području. Pritom je u danas usvojenoj europskoj prednormi (1997.) zadržana Winterova formula s korigiranom konstantom 0,22 koja još uvijek osigurava najveću rezervu. Sa sličnom smo se logikom služili pri usvajanju krivulje (8) u našoj normi, ali to je bilo još 1986. godine bez poznavanja velikog broja novih statistički obrađenih podataka.

U prijedlogu konverzije za trajnu normu konstanta 0,22 se mijenja u 0,05 (3 + ψ) pa se tako postiže daljnje poboljšanje Winterove formule (11), ali još uvijek manje od važeće DIN norme (9). Ilustracija ovih odnosa prikazana je na slici 4.



Slika 4. Usporedba krivulja za izbočivanje ENV, prEN i DIN norme

Autori novog prijedloga s formulom (11) pozivaju se na izvršenu kalibraciju sa statističkom obradom [8] uz  $\gamma_M = 1,1$  i usporedbom pojednostavljenoga postkritičnog postupka iz osnovnog dijela dokumenta ENV 1993-1-1.

### 4 Utjecaj posmika na stabilnost

U osnovnom dokumentu ENV 1993-1-1 [2] predviđene su dvije alternative za dokazivanje sigurnosti od izbočivanja na posmik. To je pojednostavljeni postkritični postupak sa zatvorenim rješenjima i metoda vlačnog polja prilikom naponskih prelaganja za granično stanje nosivosti.

U ovom dokumentu (ENV 1993-1-5) [3] predviđa i treći postupak s efektivnom debljinom  $\chi_v t$  koja se definira uz tri karakteristične vitkosti slično kao kod pojednostavljenoga postkritičnog postupka. Svi punostijeni nosači koji imaju vitkost  $b_w/t$  veću od  $73 \varepsilon/\eta$  za neukružene hrptove odnosno  $31 \varepsilon \sqrt{k_\tau}/\eta$  za ukružene hrptove moraju se ispitati na izbočenje.

$\varepsilon$  je parametar za utjecaj granice popuštanja,  $k_\tau$  je koeficijent izbočivanja za posmik ukružene ploče, a  $\eta$  utjecajni faktor materijala i uzima se kako slijedi:

$$\eta = 1,20 \gamma_{M1}/\gamma_{M0} \text{ za čelike S235, S275 i S355,}$$

$$\eta = 1,05 \gamma_{M1}/\gamma_{M0} \text{ za čelike S420 i S460}$$

$$\gamma_{M1} = 1,1; \quad \gamma_{M0} = 1,0 \text{ (parcijalni faktori sigurnosti).}$$

(Napomena: ograničenja vitkosti i faktori  $\eta$  prije su bili nešto drugačije definirani ali s jednakim graničnim rezultatom).

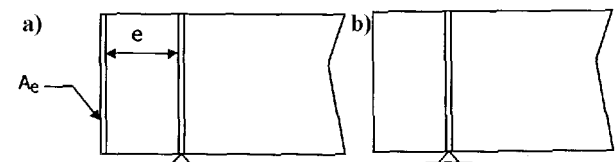
Analogno kao što se za normalne napone uvodi efektivna širina, posmična otpornost definira se s efektivnom debljinom:

$$V_{c,Rd} = \chi_{vd} f_y b \cdot t / \sqrt{3} \quad (12)$$

$$\chi_v = \chi_w + \chi_f \text{ ali ne više od } \eta \quad (13)$$

Dio  $\chi_w$  odnosi se na hrbat, a  $\chi_f$  na pojas koji se najčešće može zanemariti.  $f_{yd} = f_y/\gamma_{M1}$  po pitanju vertikalnog posmika.

Tu treba razlikovati nosač ukrućen na kraju prema slici 5.a ili je neukrućen 5.b.



Slika 5. Kriterij za ukrućenje nosača na krajevima

Termin na krajevima ukrućeni nosač pojavio se s definiranjem mehanizma granične nosivosti na posmik. S dodatnim ukrućenjem  $A_e$  povećava se krutost na posmik pa je za veće vitkosti redukcija na posmik  $\chi_w$  smanjena.

Za hrptove bez poprečnih ukrućenja osim nad ležajima parametar vitkosti se definira:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{b_w}{86,4t\epsilon} \quad (14)$$

(Oznaka  $b_w$  odnosi se na visinu hrpta  $h_w$ )

Za hrptove s poprečnim ukrućenjima s uzdužnim ukrućenjima ili bez usporedna je vitkost definirana:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{b_w}{37,4t\epsilon\sqrt{k_\tau}} \quad (15)$$

Efektivna debljina hrpta dobije se s faktorom redukcije:

$$t_{e,w} = \chi_w \cdot t \quad (16)$$

Faktori redukcije su definirani:

$$\text{Za } \bar{\lambda}_w < \frac{0,83}{\eta} \quad \chi_v = \eta \quad (17)$$

$$\text{Za } \frac{0,83}{\eta} \leq \bar{\lambda}_w \leq 1,08 \quad \chi_v = 0,83 / \bar{\lambda}_w \quad (18)$$

$$\text{Za } \bar{\lambda}_w \geq 1,08 \quad \chi_v = 0,83 / \bar{\lambda}_w \quad \text{za nosače koji nisu dodatno ukrućeni na krajevima.} \quad (19)$$

$$\chi_v = \frac{1,37}{(0,7 + \bar{\lambda}_w)} \quad \text{za nosače dodatno ukrućene na krajevima.} \quad (20)$$

### 5 Koeficijenti izbočivanja za posmik [3].

$$k_\tau = 5,34 + 4,0 \left( \frac{h_w}{a} \right)^2 + k_{\tau st} \quad \text{za } a/h_w \geq 1 \quad (21)$$

$$k_\tau = 4,00 + 5,34 \left( \frac{a}{h_w} \right)^2 + k_{\tau st} \quad \text{za } a/h_w < 1 \quad (22)$$

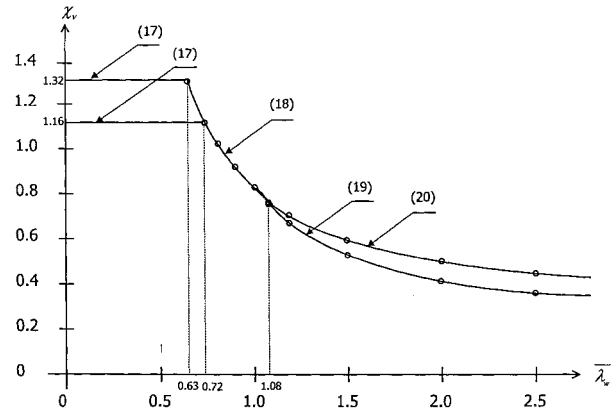
Prvi dio izraza odnosi se na poznate koeficijente za izbočivanje bez uzdužnih rebara, a dodatni je izraz  $k_{\tau st}$  dodatka za ukrućene limove između poprečnih rebara.

$$k_{\tau st} = 9 \left( \frac{h_w}{a} \right)^2 \left( \frac{I_{sl}}{t^3 h_w} \right)^{3/4} \quad \text{ali ne manje od } \frac{2,1}{t} \left( \frac{I_{sl}}{h_w} \right)^{1/3} \quad (23)$$

gdje je:

$a$  - razmak poprečnih ukrućenja

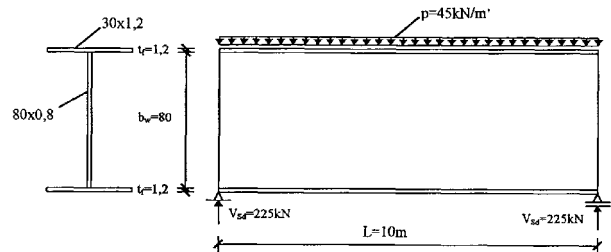
$I_{sl}$  - moment tromosti uzdužnih rebara s odgovarajućim dijelom lima. Za više uzdužnih rebara bez obzira na raspored uzima se zbroj momenata tromosti svih pojedinačnih rebara.



Slika 6. Krivulje redukcije definirane s izrazima (17) do (20)

### 7 Numerički primjer

Za primjenu analizira se zavareni nosač prikazan na slici 7.



Slika 7. Zavareni punostijeni nosač

#### Savijanje

$A = 136 \text{ cm}^2$   $I = 152824 \text{ cm}^4$   $W = 3764 \text{ cm}^3$   
čelik S235,  $\gamma_{M1} = 1,1$   $V_{sd} = 225 \text{ kN}$   $M_S = 562,5 \text{ kNm}$

#### Vitkost pojasa

$$\bar{\lambda}_p = \frac{14,6/1,2}{28,4\epsilon\sqrt{0,43}} = 0,653 < 0,673 \Rightarrow \rho = 1,0$$

#### Vitkost hrpta

$$\psi = -1,0; \quad \epsilon = 1,0; \quad k_\sigma = 23,9$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{b_w/t_w}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{80/0,8}{28,4\sqrt{23,9}} = 0,72 > 0,673$$

$$\rho = \frac{b_e}{b} = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,22}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0,72 - 0,22}{0,72^2} = 0,965$$

$$b_e = \rho b_c = 0,965 \times 40 = 38,6$$

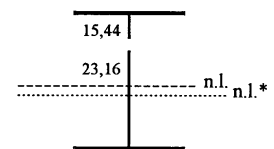
$$b_c = 40 \text{ cm}$$

$$0,4 b_c = 15,44 \text{ cm}$$

$$0,6 b_c = 23,16 \text{ cm}$$

$$\Delta b_c = 40 - 38,6 = 1,4 \text{ cm}$$

$$\Delta A = 1,12 \text{ cm}^2$$



$$e = 1,12 \times 23,86 / 134,9 = 0,20 \text{ cm}; I_{\text{netto}} = 152176 \text{ cm}^4;$$

$$W_{\text{min}} = 3742 \text{ cm}^3 \quad M_{Rd} = 3742 \times 23,5 / 1,1 = 799 \text{ kNm}$$

$$M_{Sd} / M_{Rd} = 562,5 / 799 = 0,7 < 1,0$$

### Posmik

Nosač bez poprečnih ukrućenja osim nad ležajima.

$$b_w / t = 80 / 0,8 = 100 > 73 \varepsilon / \eta; \quad \text{za S235 } \eta = 1,2 \times 1,1 = 1,32$$

$$\bar{\lambda}_w = \frac{b_w}{86,4 \varepsilon \cdot t} = \frac{80}{86,4 \cdot 0,8} = 1,157 > 1,08 \rightarrow$$

$$\rightarrow \chi_w = \frac{0,83}{\bar{\lambda}_w} = 0,717$$

Za nosač dodatno ukrućen na krajevima:

$$\chi_w = \frac{1,37}{(0,7 + 1,157)} = 0,738 > 0,717$$

$$V_{Rd} = \chi \cdot t \cdot h_w \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1} \sqrt{3}} = 0,717 \cdot 0,8 \cdot 80 \cdot \frac{23,5}{1,1 \sqrt{3}} = 566,4 \text{ kN}$$

$$V_{Sd} / V_{Rd} = 225 / 566,4 = 0,4 < 0,5 \text{ (u interakciji poprečne sile i momenta nema redukcije).}$$

### 8 Zaključak

Prikazani dio nove prednorme ENV 1993-1-5 usuglašen je na europskoj razini tek 1997. godine.

Iz geneze nastajanja krivulja izbočivanja vidljivo je postupno prilagođenje tom problemu. Za inženjere u našoj praksi, koji su se služili postojećom normom HRN UE7.121 ne će biti problema s primjenom nove norme jer su postupci čak nešto pojednostavljeni. Primjena efektivne debljine za posmično naprezane limove jest daljnje pojednostavljenje postupaka već prije usvojenih u osnovnom dokumentu ENV 1993-1-1 iz 1992. godine. S ovim zapravo trećim poznatim postupkom naglašava se kako primjena novih norma nije obvezujuća osim načela koja se posebno označavaju simbolom *P*. To posebno vrijedi za dodatke (anekse) kojih ima uz svaku normu prilično obilno, a prvenstveno imaju informativni karakter.

### LITERATURA

- [1] JUS, HRN U.E7.121: *Provjera stabilnosti nosivih čeličnih konstrukcija, izbočivanje limova*, 1986.
- [2] ENV 1993-1-1: *Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1.1. General rules and rules for building*, EN 1992.
- [3] ENV 1993-1-5: *Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1.5. General rules - supplementary rules for planar plated structures without transverse loading*, CEN 1997.
- [4] Horvatić, D., Šavor, Z.: *Metalni mostovi, Hrvatsko društvo građevinskih konstruktora*, Zagreb 1998.
- [5] Winter, G.: *Strength of thin Steel Compression Flanges*, Transactions of Civil Engineering, Vol.112 1947., str. 527.
- [6] Galambos, T.: *Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures*, 4<sup>th</sup> Edition, John Wiley, 1988.
- [7] Hirt, M.; Bez, R.: *Stahlbau*, Deutsche Ausgabe, Ernst & Sohn 1998.
- [8] Johansson, B.; Maquoi, R.; Sedlacek, G. and all: *Die Behandlung des beulens bei dünnwandigen Stahlkonstruktionen in ENV 1993-Teil 1.5 (Eurocode 3-1-5)*, Stahlbau 68 (1999), Heft 11, str. 857.-879.
- [9] Klöppel, K.; Möller, K.: *Beulwerte ausgesteifter Rechteckplatten*, Band II, Erns & Sohn, Berlin 1968.