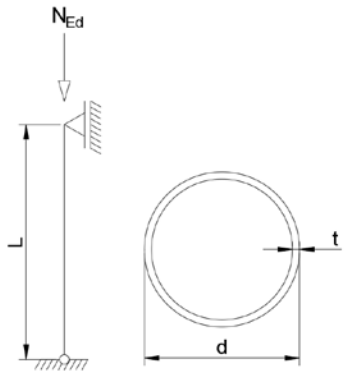
Uppgift 1



Egenskaper

Kallformad CHS 159 × 4 av den austenitiska stålsorten 1.4307

$\boldsymbol{L = 3,5\ m}$	$A = 19{,}5\ cm^2$
$\boldsymbol{N_{Ed} = 250\ kN}$	$I = 585{,}3\ cm^4$
$\boldsymbol{d = 159\ mm}$	$W_{el} = 73{,}6\ cm^3$
$\boldsymbol{t = 4\ mm}$	$W_{pl} = 96{,}1\ cm^3$

Målsättning

- Rita normalkraft-, tvärkraft- och momentdiagram för exemplet
- Genomför beräkningarna i det här exemplet med hjälp av handboken för Dimensionering av konstruktioner i rostfritt stål
- Genomför tvärsnittskontrollerna i det här exemplet genom att använda medelvärdet för tvärsnittets förhöjda sträckgräns med beaktande av töjhärdning (The Continious Strength Method, CSM)
- Använd lämplig app för att göra motsvarande beräkning.

Reflektioner

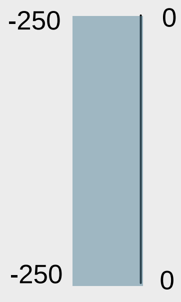
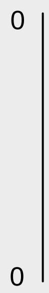
- När du kontrollerar resultatet, hur gick det? Vart blev det eventuellt fel? Insåg du i så fall vad som var fel?Blev det stor skillnad i resultatet då medelvärdet för tvärsnittets förhöjda sträckgräns med av töjhärdning beaktades? Hur stor skillnad blev det i % jämfört med den första beräkningen och då CSM-metoden användes?
- Överensstämde resultatet då du använde appen jämfört med handberäkningen, om inte vad kan det bero på?

Resultat

$\boldsymbol{N_{c,Rd} = 390\ kN}$, $\boldsymbol{N_{b,Rd} = 288,6\ kN}$, $\boldsymbol{f_{ya} = 245\ N/mm^2}$, $\boldsymbol{f_{csm} = 266\ N/mm^2}$, $\boldsymbol{N_{csm,Rd,} = 471,6\ kN}$

Lösning uppgift 1

Normalkraft-, tvärkraft- och momentdiagram

N [kN]	V [kN]	M [kNm]
		

Egenskaper

Kallformad CHS 159 × 4 av den austenitiska stålsorten 1.4307

$\boldsymbol{L = 3,5\ m}$	$A = 19,5\ cm^2$
$\boldsymbol{N_{Ed} = 250\ kN}$	$I = 585,3\ cm^4$
$\boldsymbol{d = 159\ mm}$	$W_{el} = 73,6\ cm^3$
$\boldsymbol{t = 4\ mm}$	$W_{pl} = 96,1\ cm^3$
$\boldsymbol{f_y = 220\ N/mm^2}$	$E = 200000\ N/mm^2$
$\boldsymbol{f_u = 520\ N/mm^2}$	

Tvärsnittsklassning

$\boldsymbol{\varepsilon = 1,01}$

$\boldsymbol{d/t = 159/4 = 39,8}$

För klass 1 gäller, $\boldsymbol{d/t \leq 50\varepsilon^2}$, därför tillhör tvärsnittet klass 1.

Tvärsnittets tryckkraftskapacitet

För tvärsnitt i klass 1:

$$\boldsymbol{N_{\mathrm{c,Rd}} = A_{\mathrm{g}} f_{\mathrm{y}} / \gamma_{\mathrm{M0}}}$$

$$\boldsymbol{N_{\mathrm{c,Rd}} = \frac{19,5 \times 220 \times 10^{-1}}{1,1} = 390\ \mathrm{kN}}$$

Tvärsnittets tryckkraftskapacitet med beaktande av knäckning

$$\boldsymbol{N_{\mathrm{b,Rd}} = \frac{\chi A f_{\mathrm{y}}}{\gamma_{\mathrm{M1}}}}$$

$$\chi = \boldsymbol{\frac{1}{\phi + \left[\phi^2 - \bar{\lambda}^2\right]^{0,5}} \leq 1}$$

$$\boldsymbol{\phi = 0,5\left(1 + \alpha\left(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0\right) + \bar{\lambda}^2\right)}$$

Beräkna den elastiska kritiska bucklingslasten:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}{}^2} = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 585,3 \times 10^4}{(3,50 \times 10^3)^2} \times 10^{-3} = 943,1\ \text{kN}$$

Beräkna slankhetsparametern:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{19,5 \times 10^2 \times 220}{943,1 \times 10^3}} = 0,67$$

Använder imperfektionsfaktorn α = 0,49 och $\bar{\lambda}_0$ = 0,2 för den kallformade profilen:

$$\phi = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (0,67 - 0,2) + 0,67^2) = 0,84$$

$$\chi = \frac{1}{0,84 + [0,84^2 - 0,67^2]^{0,5}} = 0,74 \leq 1$$

$$N_{b,Rd} = 0,74 \times 19,5 \times 220 \times \frac{10^{-1}}{1,1} = 288,6\ \text{kN}$$

Aktuell last är N_{Ed} = 250 kN.

Tvärsnittet har tillräcklig tryckkraftskapacitet med beaktande av knäckning.

Förbättring av tvärsnittets kapacitet med beaktande av töjhärdning

$$f_{ya} = f_{yCHS} = 0,85K\left(\varepsilon_{CHS} + \varepsilon_{p0,2}\right)^{n_p}\ and\ f_y \leq f_{yCHS} \leq f_u$$

Beräkning av hjälpparametrar:

$$\varepsilon_{CHS} = \frac{t}{2(d-t)} = \frac{4}{2(159-4)} = 0,0129$$

$$\varepsilon_{p0,2} = 0,002 + \frac{f_y}{E} = 0,002 + \frac{220}{200\,000} = 0,0031$$

$$\varepsilon_u = 1 - \frac{f_y}{f_u} = 1 - \frac{220}{520} = 0,5769$$

$$n_p = \frac{ln(f_y/f_u)}{ln(\varepsilon_{p0,2}/\varepsilon_u)} = \frac{ln(220/520)}{ln(0,0031/0,5769)} = 0,1646$$

$$K = \frac{f_y}{\varepsilon_{p0,2}^{n_p}} = \frac{220}{0,0031^{0,1646}} = 569,30$$

Vilket ger:

$$f_{ya} = 0,85 \cdot 569,30\ (0,0129 + 0,0031)^{0,1646} = 245\ N/mm^2$$

$$220\ N/mm^2 \leq 245\ N/mm^2 \leq 520\ N/mm^2$$

Vilket ligger inom gränserna.

Dimensionering med beaktande av töjhärdning (CSM)

I den här beräkningen $f_y = f_{ya} = 245\ N/mm^2$.

$$\varepsilon_y = f_y/E = 245/200\,000 = 0,001225$$

$$\varepsilon_u = C_3\left(1 - f_y/f_u\right) = 1,00 \cdot (1 - 245/520) = 0,529$$

Tabell D.1	*Rostfritt stål*	*C_1*	*C_2*	*C_3*	

	Austenit	*0,10*	*0,16*	*1,00*	

$$E_{\mathrm{sh}} = \frac{f_{\mathrm{u}} - f_{\mathrm{y}}}{C_2\varepsilon_{\mathrm{u}} - \varepsilon_{\mathrm{y}}} = \frac{520 - 245}{0,16 \cdot 0,529 - 0,001225} = 3296,77\ N/mm^2$$

$$\frac{\varepsilon_{\mathrm{csm}}}{\varepsilon_{\mathrm{y}}} = \begin{cases} \dfrac{4,44 \times 10^{-3}}{\bar{\lambda}_{\mathrm{c}}{}^{4,5}} \ \leq\ \min\left(15;\ \dfrac{C_1\varepsilon_{\mathrm{u}}}{\varepsilon_{\mathrm{y}}}\right) & \text{for } \bar{\lambda}_{\mathrm{c}} \leq 0,30 \\ \left(1 - \dfrac{0,224}{\bar{\lambda}_{\mathrm{c}}{}^{0,342}}\right)\dfrac{1}{\bar{\lambda}_{\mathrm{c}}{}^{0,342}} & \text{for } \bar{\lambda}_{\mathrm{c}} > 0,30 \end{cases}$$

Beräkna först $\bar{\lambda}_{\mathrm{c}}$:

$$\bar{\lambda}_{\mathrm{c}} = \sqrt{f_{\mathrm{y}}/f_{\mathrm{cr,c}}} = \sqrt{245/6090,34} = 0,20 \leq 0,30$$

$$f_{\mathrm{cr,c}} = \frac{E}{\sqrt{3(1-v^2)}}\frac{2t}{D} = \frac{200\,000}{\sqrt{3(1-0,3^2)}}\frac{2 \cdot 4}{159} = 6090,34\ N/mm^2$$

$\bar{\lambda}_{\mathrm{c}} \leq 0,30$ vilket ger:

$$\frac{\varepsilon_{\mathrm{csm}}}{\varepsilon_{\mathrm{y}}} = \frac{4,44 \times 10^{-3}}{0,2^{4,5}} = 6,21\ \leq\ \min\left(15;\ \frac{0,1 \cdot 0,529}{0,001225}\right) = \min(15; 43,18)$$

Vilket ligger inom gränserna.

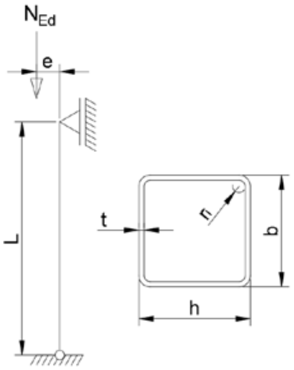
Tvärsnittets bärförmåga

$$f_{\mathrm{csm}} = f_{\mathrm{y}} + E_{\mathrm{sh}}\varepsilon_{\mathrm{y}}\big((\varepsilon_{\mathrm{csm}}/\varepsilon_{\mathrm{y}}) - 1\big) = 245 + 3296,77 \cdot 0,001225(6,21 - 1) = 266\ N/mm^2$$

$$N_{\mathrm{c,Rd}} = N_{\mathrm{csm,Rd}} = \frac{Af_{\mathrm{csm}}}{\gamma_{\mathrm{M0}}} = \frac{1950 \cdot 266}{1,1} = 471,6\ kN$$

Beräkningen är klar.

Uppgift 2



Egenskaper

Kallformad fyrkantsprofil (SHS) 100x100x5 av den ferritiska stålsorten 1.4016.

$\boldsymbol{L = 3,5\ m}$	$r_i = 5\ mm$
$\boldsymbol{N_{Ed} = 250\ kN}$	$A = 1818{,}45\ mm^2$
$\boldsymbol{h = 100\ mm}$	$I = 266{,}79\ cm^4$
$\boldsymbol{b = 100\ mm}$	$W_{el} = 53{,}36\ cm^3$
$\boldsymbol{t = 5\ mm}$	$W_{pl} = 63{,}73\ cm^3$

Målsättning

- Rita normalkraft-, tvärkraft- och momentdiagram för exemplet
- Kan tvärsnittet bära upp kraften 250 kN, då den appliceras med excentriciteten $\boldsymbol{e = 100\ mm}$? I det här exemplet behöver inte eventuell instabilitet kontrolleras och använd medelvärdet för tvärsnittets förhöjda sträckgräns med beaktande av töjhärdning (The Continious Strength Method, CSM).

Reflektioner

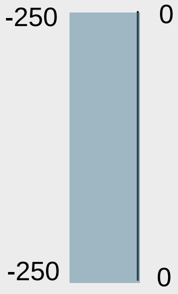
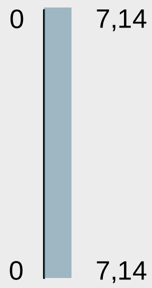
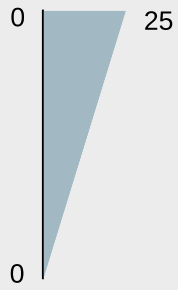
- När du kontrollerar resultatet, hur gick det? Vart blev det eventuellt fel? Insåg du i så fall vad som var fel?

Resultat

$\boldsymbol{f_{ya} = 329,55\ N/mm^2}$, $\boldsymbol{f_{cr,p} = 2501,90\ N/mm^2}$, $\boldsymbol{M_{\mathrm{csm,y,Rd,}} = 20,27\ kNm}$, $\boldsymbol{N_{\mathrm{csm,Rd}} = 584,76\ kN}$, $\boldsymbol{M_{\mathrm{csm,y,Rd,}} = 15,10\ kNm}$

Lösning uppgift 2

Normalkraft-, tvärkraft- och momentdiagram

N [kN]	V [kN]	M [kNm]
		

Egenskaper

Kallformad fyrkantsprofil (SHS) 100x100x5 av den ferritiska stålsorten 1.4016.

$\boldsymbol{L = 3{,}5\ m}$	$r_i = 5\ mm$
$\boldsymbol{N_{Ed} = 250\ kN}$	$A = 1818{,}45\ mm^2$
$\boldsymbol{h = 100\ mm}$	$I = 266{,}79\ cm^4$
$\boldsymbol{b = 100\ mm}$	$W_{el} = 53{,}36\ cm^3$
$\boldsymbol{t = 5\ mm}$	$W_{pl} = 63{,}73\ cm^3$
$\boldsymbol{f_y = 260\ N/mm^2}$	$E = 200000\ N/mm^2$
$\boldsymbol{f_u = 450 N/mm^2}$	

Förbättring av tvärsnittets kapacitet med beaktande av töjhärdning

$$\boldsymbol{f_{ya} = \frac{f_{yc}\,A_{c,rolled} + f_{yf}(A - A_{c,rolled})}{A}}$$

Där:

$$\boldsymbol{f_{yc} = 0{,}85K\,(\varepsilon_c + \varepsilon_{p0,2})^{n_p}\ and\ f_y \le f_{yc} \le f_u}$$

$$\boldsymbol{f_{yf} = 0{,}85K\,(\varepsilon_f + \varepsilon_{p0,2})^{n_p}\ and\ f_y \le f_{yf} \le f_u}$$

Beräkning av hjälpparametrar:

$$\boldsymbol{\varepsilon_{p0,2} = 0{,}002 + \frac{260}{200\,000} = 0{,}0033}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon_c = \frac{t}{2(2r_i + t)} = \frac{5}{2(2\cdot 5 + 5)} = 0{,}1667}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon_f = \left[\frac{t}{900}\right] + \left[\frac{\pi t}{2(b + h - 2t)}\right] = \left[\frac{5}{900}\right] + \left[\frac{\pi \cdot 5}{2(100 + 100 - 2\cdot 5)}\right] = 0{,}047}$$

$$\boldsymbol{n_p = \frac{ln(f_y/f_u)}{ln(\varepsilon_{p0,2}/\varepsilon_u)} = \frac{ln(260/450)}{ln(0{,}0033/0{,}253)} = 0{,}126}$$

$$K = \frac{f_y}{\varepsilon_{p0,2}^{n_p}} = \frac{260}{0,0033^{0,126}} = 534,12$$

$$\varepsilon_u = 0,6\left[1 - \frac{f_y}{f_u}\right] = 0,6\left[1 - \frac{260}{450}\right] = 0,253$$

Beräkna $A_{c,rolled}$ där n_c är antalet 90° horn I tvärsnittet

$$A_{c,rolled} = \left(n_c\,\pi\frac{t}{4}\right)(2r_i + t) \;+\; 4n_c t^2 = \left(4\cdot\pi\frac{5}{4}\right)(2\cdot 5 + t) \;+\; 4\cdot 4\cdot 5^2 = 635,62\ mm^2$$

$$f_{yc} = 0,85\cdot 534,12\ (0,1667 + 0,0033)^{0,126} = 363,16\ N/mm^2$$

$$BUT: 260\ N/mm^2 \le 363,16\ N/mm^2 \le 450\ N/mm^2\ (OK)$$

$$f_{yf} = 0,85\cdot 534,12\ (0,047 + 0,0033)^{0,126} = 311,50\ N/mm^2$$

$$BUT: 260\ N/mm^2 \le 311,50\ N/mm^2 \le 450\ N/mm^2\ (NOT\ OK)$$

Beräkna f_{ya} genom att använda $f_{yf} = 311,50\ N/mm^2$ and $f_{yc} = 363,16\ N/mm^2$:

$$f_{ya} = \frac{363,16\cdot 635,62 \;+\; 311,50\cdot(1818,45 - 635,62)}{1818,45} = 329,55\ N/mm^2$$

Dimensionering med beaktande av töjhärdning (CSM)

I den här beräkningen $f_y = f_{ya} = 329,55\ N/mm^2$.

$$\varepsilon_y = f_y/E = 329,55/200\,000 = 0,0016$$

$$\varepsilon_u = C_3\left(1 - f_y/f_u\right) = 0,6\cdot(1 - 329,55/450) = 0,161$$

Tabell D.1	*Rostfritt stål*	*C_1*	*C_2*	*C_3*	
	Ferritiskt	*0,40*	*0,45*	*0,60*	

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{C_2\varepsilon_u - \varepsilon_y} = \frac{450 - 329,55}{0,45\cdot 0,161 - 0,0016} = 1700,07\ N/mm^2$$

$$\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = \begin{cases} \dfrac{0,25}{\bar{\lambda}_p^{\,3,6}} \le \min\left(15, \dfrac{C_1\varepsilon_u}{\varepsilon_y}\right) & \text{for } \bar{\lambda}_p \le 0,68 \\ \left(1 - \dfrac{0,222}{\bar{\lambda}_p^{\,1,050}}\right)\dfrac{1}{\bar{\lambda}_p^{\,1,050}} & \text{for } \bar{\lambda}_p > 0,68 \end{cases}$$

Beräkna först $\bar{\lambda}_p$:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{f_y/f_{cr,p}}$$

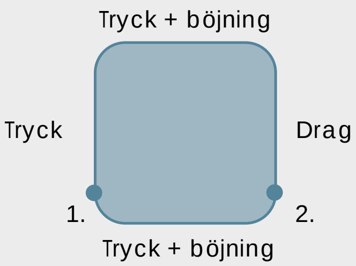
$$f_{cr,p} = \frac{k_\sigma \pi^2 E t^2}{12(1 - \upsilon^2)\bar{b}^2}$$

Där:

$$\bar{b} = b - 3t = 100 - 3 \cdot 5 = 85\ mm$$

$$\upsilon = 0,3$$

Eftersom belastningssituationen ger både tryck- och böjpåkänningar behöver du beräkna spänningsnivåerna i profilen. Du behöver bestämma parametern k_σ. Se tabell 5.3 och 5.4 i handboken för Dimensionering av konstruktioner i rostfritt stål.



På ritningen nedan kan man se att en sida är helt tryckt och två andra belastas med kombinerat tryck och böjning. Av erfarenhet vet vi att tryckzoner ger ett onödigt konservativt resultat. Därför behöver vi inte beräkna $f_{cr,p}(tryck + böjning)$. För att ge ett fullständigt svar tar vi med den beräkningen ändå.

$$\sigma_1 = \frac{N}{A} + \frac{My}{I} = \frac{250\,000}{1818,45} + \frac{25 \cdot 10^6 \cdot 50}{266,79 \cdot 10^4} = 606\ N/mm^2 (tryck)$$

$$\sigma_2 = \frac{N}{A} - \frac{My}{I} = \frac{250\,000}{1818,45} - \frac{25 \cdot 10^6 \cdot 50}{266,79 \cdot 10^4} = 331\ N/mm^2 (drag)$$

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{331}{-606} = -0,55$$

$$k_\sigma = 7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2 = 7,81 - 6,29 \cdot (-0,55) + 9,78 \cdot (-0,55)^2 = 14,23$$

Vilket ger:

$$f_{cr,p}(tryck + böjning) = \frac{14,23 \cdot \pi^2 \cdot 200\,000 \cdot 5^2}{12(1 - 0,3^2) \cdot 85^2} = 8900,5\ N/mm^2$$

$$f_{cr,p}(tryck) = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot 200\,000 \cdot 5^2}{12(1 - 0,3^2) \cdot 85^2} = 2501,90 N/mm^2$$

Eftersom en sida belastas med enbart tryckspänning väljer vi $f_{cr,p}$ på trycksidan. Ett lägre värde på $f_{cr,p}$ resulterar i ett högt $\bar{\lambda}_p$. Vilket ger $f_{cr,p} = 2501,90 N/mm^2$.

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{329,55/2501,90} = 0,36 \leq 0,68$$

$$\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = \frac{0,25}{\bar{\lambda}_p^{\ 3,6}} = \frac{0,25}{0,36^{3,6}} = 9,89 \leq \ \min\left(15; \frac{0,4 \cdot 0,161}{0,0016}\right) = \min(15;\ 40,25)$$

Vilket ligger inom gränserna eftersom: $\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = 9,89$.

För det kombinerade lastfallet är följande formel tillämpbar:

$$M_{\mathrm{y,Ed}} \leq M_{\mathrm{R,csm,y,Rd}} = M_{\mathrm{csm,y,Rd}} \frac{(1 - n_{\mathrm{csm}})}{(1 - 0,5a_{\mathrm{w}})} \leq M_{\mathrm{csm,y,Rd}}$$

Där:

$$M_{\mathrm{csm,Rd}} = \frac{W_{\mathrm{pl}} f_{\mathrm{y}}}{\gamma_{\mathrm{M0}}} \left[1 + \frac{E_{\mathrm{sh}}}{E} \frac{W_{\mathrm{el}}}{W_{\mathrm{pl}}} \left(\frac{\varepsilon_{\mathrm{csm}}}{\varepsilon_{\mathrm{y}}} - 1\right) - \left(1 - \frac{W_{\mathrm{el}}}{W_{\mathrm{pl}}}\right) \Big/ \left(\frac{\varepsilon_{\mathrm{csm}}}{\varepsilon_{\mathrm{y}}}\right)^{\alpha}\right]$$

För $\boldsymbol{\alpha}$, se tabell D.2.

$$M_{\mathrm{csm,Rd}} = \frac{63,73 \cdot 10^3 \cdot 329,55}{1,1} \left[1 + \frac{1700,07}{200\,000} \cdot \frac{53,36 \cdot 10^3}{63,73 \cdot 10^3} (9,89 - 1) - \left(1 - \frac{53,36 \cdot 10^3}{63,73 \cdot 10^3}\right) \Big/ (9,89)^2\right]$$

$$M_{\mathrm{csm,Rd}} = 20,27\ kNm$$

OBS! Vi kan redan se att tvärsnittet INTE har tillräcklig momentbärförmåga, 25 kNm. För att ge ett fullständigt svar slutför vi beräkningen ändå.

RHS med $\bar{\lambda}_{\mathrm{p}} \leq 0,60$ med kombinerad belastning:

$$\left[\frac{M_{\mathrm{y,Ed}}}{M_{\mathrm{R,csm,y,Rd}}}\right]^{\alpha_{\mathrm{csm}}} \leq 1$$

Där:

$$\alpha_{\mathrm{csm}} = 1,66/(1 - 1,13 {n_{\mathrm{csm}}}^2)$$

$$M_{\mathrm{R,csm,y,Rd}} = M_{\mathrm{csm,y,Rd}} \frac{(1 - n_{\mathrm{csm}})}{(1 - 0,5a_{\mathrm{w}})} \leq M_{\mathrm{csm,y,Rd}}$$

Då:

$$n_{\mathrm{csm}} = \frac{N_{\mathrm{Ed}}}{N_{\mathrm{csm,Rd}}} = \frac{250}{584,76} = 0,43$$

$$N_{\mathrm{csm,Rd}} = \frac{A f_{\mathrm{csm}}}{\gamma_{\mathrm{M0}}} = \frac{1818,45 \cdot 353,73}{1,1} = 584,76\ kN$$

$$f_{\mathrm{csm}} = f_{\mathrm{y}} + E_{\mathrm{sh}} \varepsilon_{\mathrm{y}} (\varepsilon_{\mathrm{csm}}/\varepsilon_{\mathrm{y}} - 1) = 329,55 + 1700,07 \cdot 0,0016(9,89 - 1) = 353,73\ N/mm^2$$

$$\alpha_{\mathrm{csm}} = 1,66/(1 - 1,13 \cdot 0,43^2) = 2,10$$

$$a_{\mathrm{w}} = \frac{(h - 3t)2t}{A} = \frac{(100 - 3 \cdot 5) \cdot 2 \cdot 5}{1818,45} = 0,47$$

$$M_{\mathrm{R,csm,y,Rd}} = 20,27 \cdot 10^6 \cdot \frac{(1 - 0,43)}{(1 - 0,5 \cdot 0,47)} = 15,1\ kNm \leq 20,27\ kNm$$

Tvärsnittet har INTE tillräcklig bärförmåga för den excentricka lasten om 250 kN.

Beräkningen är klar.