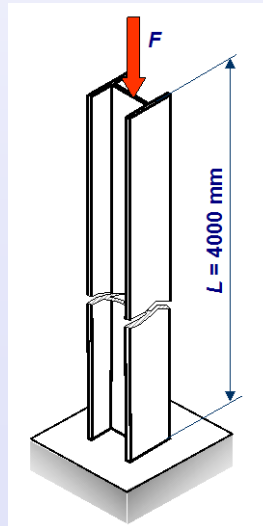


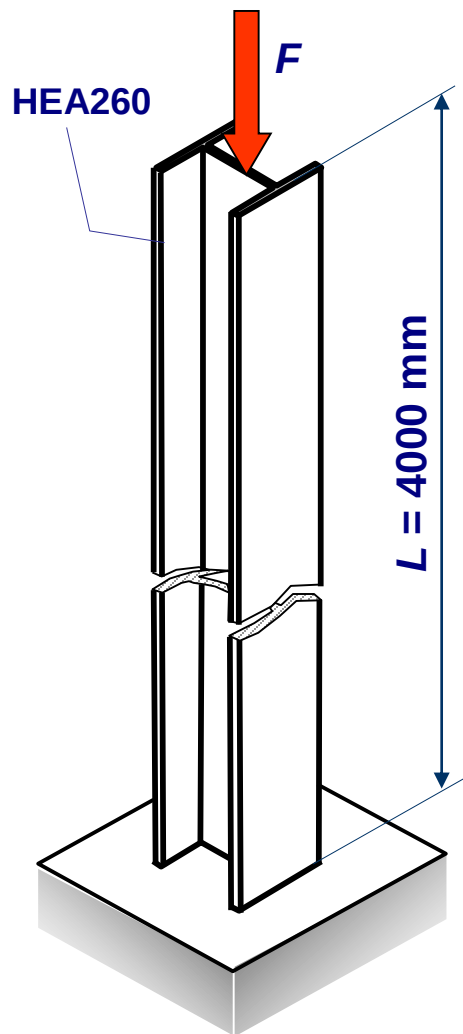
TUGEVUSÕPETUS

NÕTKE: Lubatav koormus



1. Algandmed ja ülesande püstitus

1.1. H-profiiliga samm



Arvutada sambale suurim
lubatav koormus F

Arvestama peab surutud
detaili saledusest
tulenevat nõtkekohtu

Materjal: ehitusteras S235

**Nõutav varutegur (piirkoormuse suhtes):
[s] = 2**

Materjali elastsusmoodul: $E = 210 \text{ GPa}$

1.2. HEA260 profiil

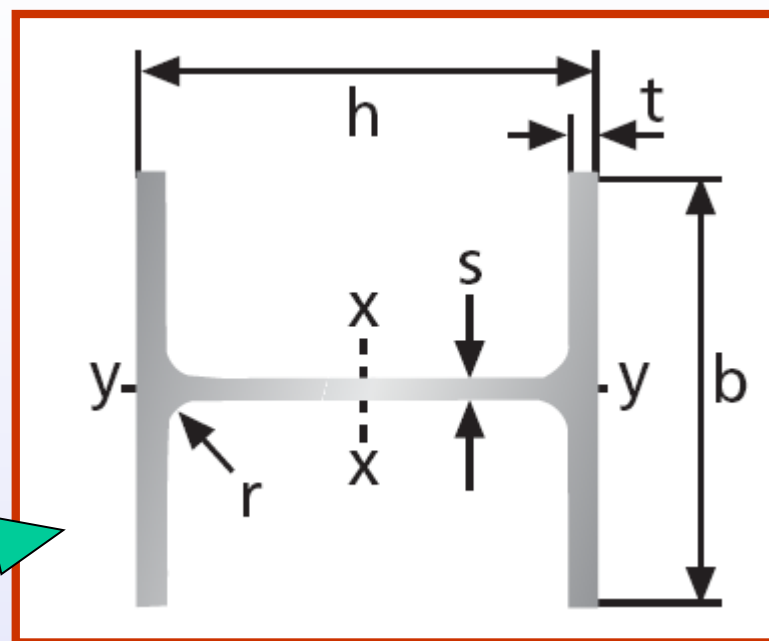
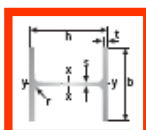
HEA-LEVEÄLAIPPAPALKIT

HEA beam

Teräslaji SFS-EN 10 025 DIN 17100
Toleranssi SFS-EN 10 034 DIN 1025/3
Toimitus SFS-EN 10 204/3.1.8 DIN 50 049/3.1.8

mm	kg/m	S235JRG2 / S275JR 12 m	12 m	S355J2G3 15 m	18 m
100	16,7	*	*		
120	19,9	*	*		
140	24,7	*	*	*	*
160	30,4	*	*	*	*
180	35,5	*	*	*	*
200	42,3	*	*	*	*
220	50,5	*	*	*	*
240	60,3	*	*	*	*
260	68,2	*	*	*	*
280	76,4	*	*	*	*
300	88,3	*	*	*	*
320	97,6	*	*	*	*
340	105,0	*	*	*	*
360	112,0	*	*	*	*
400	125,0	*	*	*	*
450	140,0	*	*	*	*
500	155,0	*	*	*	*
550	166,0	*	*	*	*
600	178,0	*	*	*	*

Pituustoleranssi -0/+100 mm

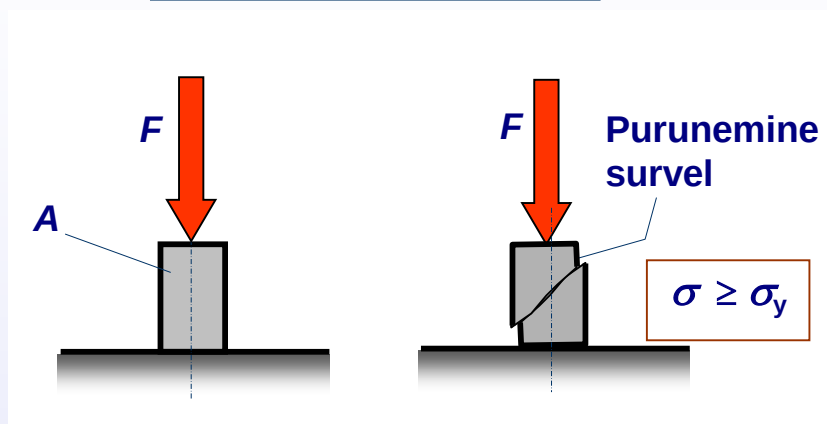


No	h	b	s	t	r	Vaippa	Poikki-	Paino	I _x	W _x	I _y	W _y	i _y
mm	mm	mm	mm	mm	mm	m ² /m	cm ²	kg/m	cm ⁴	cm ³	cm ⁴	cm ³	cm

Mitat ja painot										Staatitset arvot				
No	h	b	s	t	r	Vaippa	Poikki-	Paino	I _x	W _x	i _x	I _y	W _y	i _y
	mm	mm	mm	mm	mm	m ² /m	cm ²	kg/m	cm ⁴	cm ³	cm	cm ⁴	cm ³	cm
100	96	100	5,0	8,0										
120	114	120	5,0	8,0										
140	133	140	5,5	8,5										
160	152	160	6,0	9,0										
180	171	180	6,0	9,5										
200	190	200	6,5	10,0										
220	210	220	7,0	11,0										
240	230	240	7,5	12,0										
260	250	260	7,5	12,5										
280	270	280	8,0	13,0										
300	290	300	8,5	14,0										
320	310	300	9,0	15,5										
340	330	300	9,5	16,5										
360	350	300	10,0	17,5										
400	390	300	11,0	19,0										
450	440	300	11,5	21,0	27	2,01	178	140	63720	2900	18,9	9470	631	7,29
500	490	300	12,0	23,0	27	2,11	198	155	86970	3550	21,0	10370	691	7,24
550	540	300	12,5	24	27	2,21	212	166	111900	4150	23,0	10820	721	7,15
600	590	300	13,0	25	27	2,31	226	178	141200	4790	25,0	11270	751	7,05

1.3. Nõtkehoht SALEDA varda surve

Tüsed varda surve



Tüsed varda tugevustingimus SURVEL

$$S = \frac{\sigma_y}{\sigma} = \frac{A\sigma_y}{N} \geq [S]_{\text{Surve}}$$

Piirteisundiks on voolavus

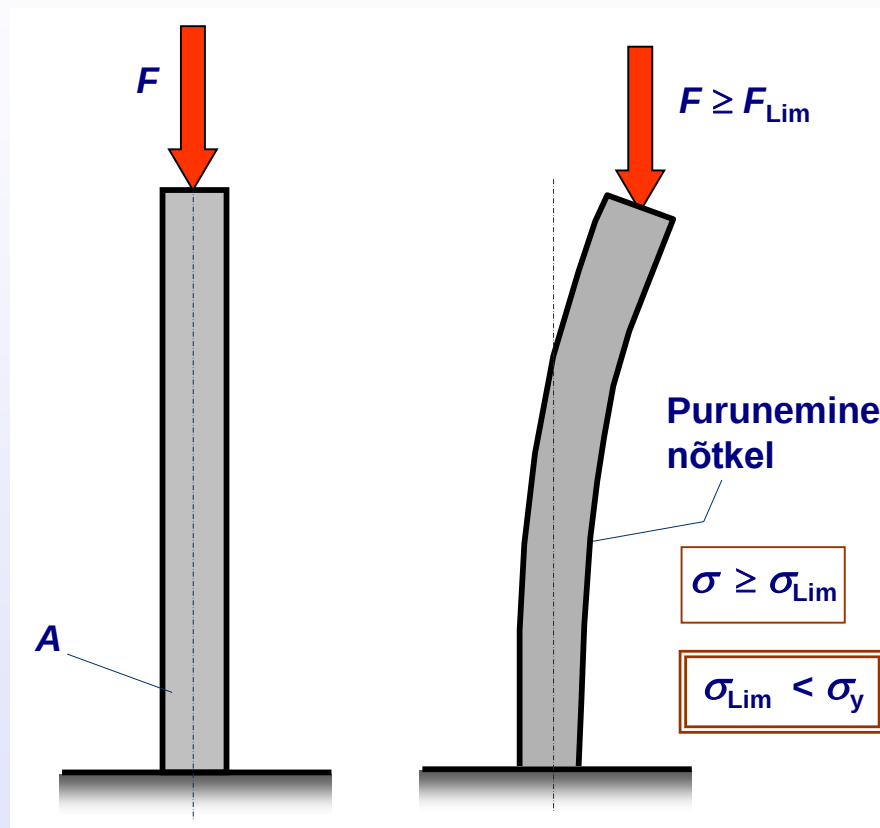
Saleda varda tugevustingimus NÕTKEL

$$S = \frac{F_{\text{Lim}}}{F} \geq [S]_{\text{Nõtkel}}$$

Piirteisundiks on nõtkel

NÕTKE = varda stabiilsuse kadumine surve

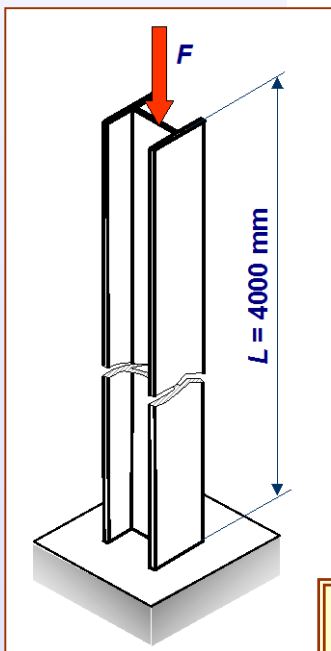
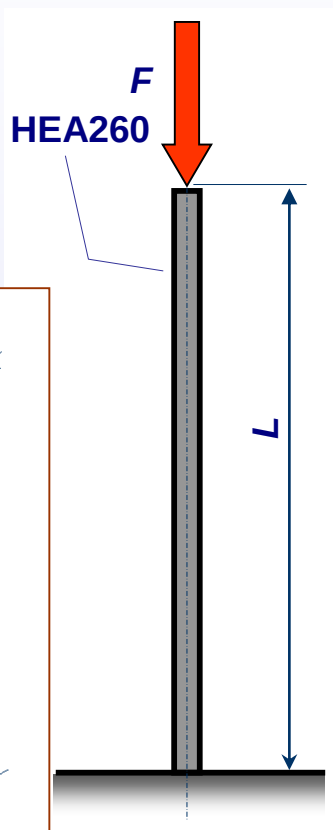
Saleda varda surve



2. Surutud varda saledus

2.1. Varda saleduse näitajad

Arvutuskeem



Varda saledus

$$\lambda = \frac{L_E}{i}$$

Varda nõtkepikkus

Ristlõike inertsiraadius

Ristlõike inertsiraadius

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

Ristlõike kesk-peainertsimoment

Ristlõike pindala

Varda nõtkepikkus

$$L_E = \mu L$$

Varda pikkus

Varda pikkuse redutseerimistegur: sõltub varda otste kinnitustüüpidest

Ristlõikel on kaks kesk-peainertsimomenti



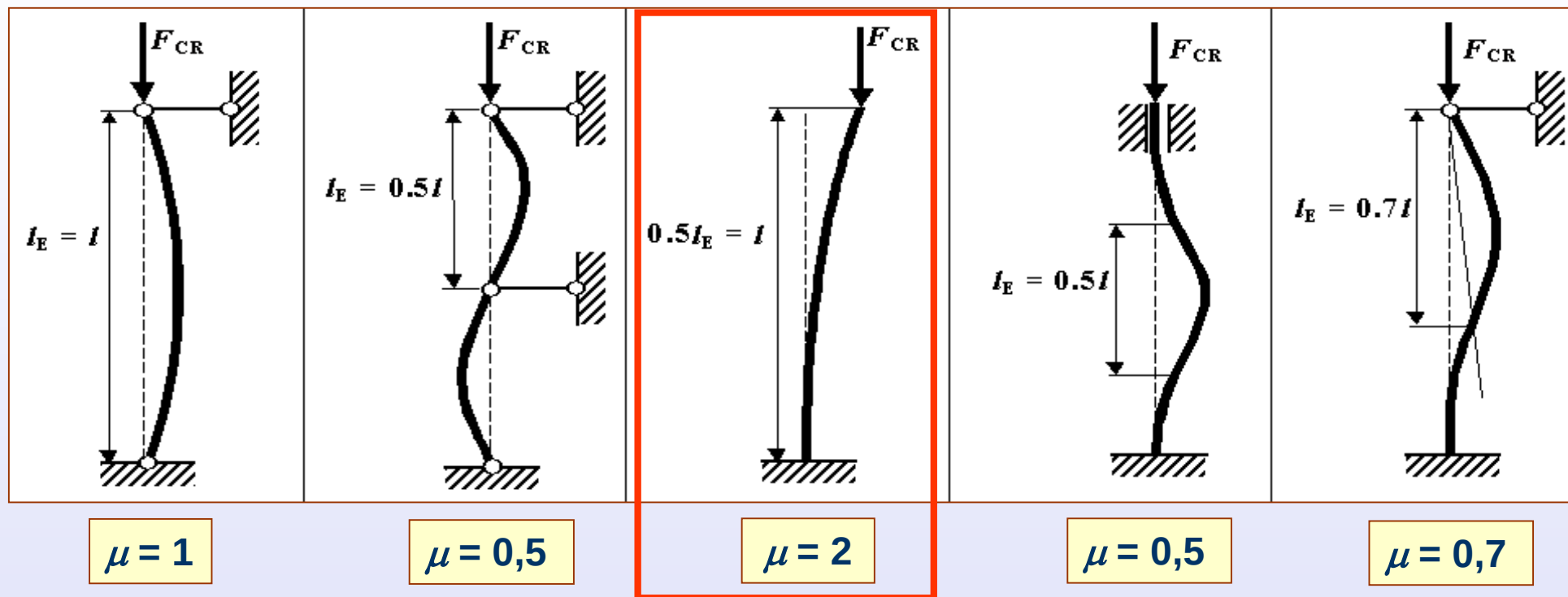
Ristlõikel on kaks inertsiraadiust ja kaks saledust



Varras nõtkub selles kesk-peatasandis, milles tema saledus on suurim

2.2. Nõtkepikkus

Varda kinnitusviisid



Varda pikkuse redutseerimistegur μ näitab, mitu varda pikkust L mahub varda telje sinusoidi poolperioodile

Varda nõtkepikkus

$$L_E = \mu L = 2 \cdot 4 = 8 \text{ m}$$

Mõlemas kesk-peatasandis

2.3. Vähim inertsiraadius ja ohtlik saledus

Standardsete ristlõigete inertsiraadiused saab ristlõike parameetrite tabelist

No	Mitat ja painot					Staattiset arvot								
	h	b	s	t	r	Vaippa	Poikki- pinta	Paino	I_x	W_x	i_x	I_y	W_y	i_y
	mm	mm	mm	mm	mm	m ² /m	cm ²	kg/m	cm ⁴	cm ³	cm	cm ⁴	cm ³	cm
260	250	260	7,5	12,5	24	1,48	86,8	68,2	10450	836	11,0	3670	282	6,50

Ristlõike inertsiraadiused

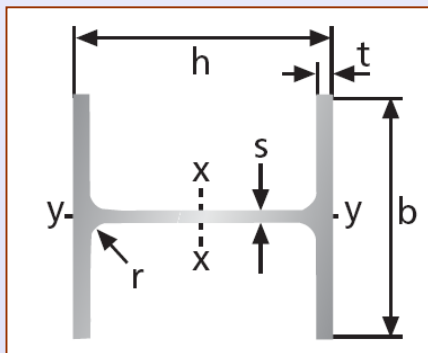
$$i_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}} = 11,0 \text{ cm}$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 6,50 \text{ cm}$$

Ristlõike vähim inertsiraadius

$$i_{\min} = \min(11,0; 6,50) = 6,50 \text{ cm}$$

Varras nõtkub telje y suhtes



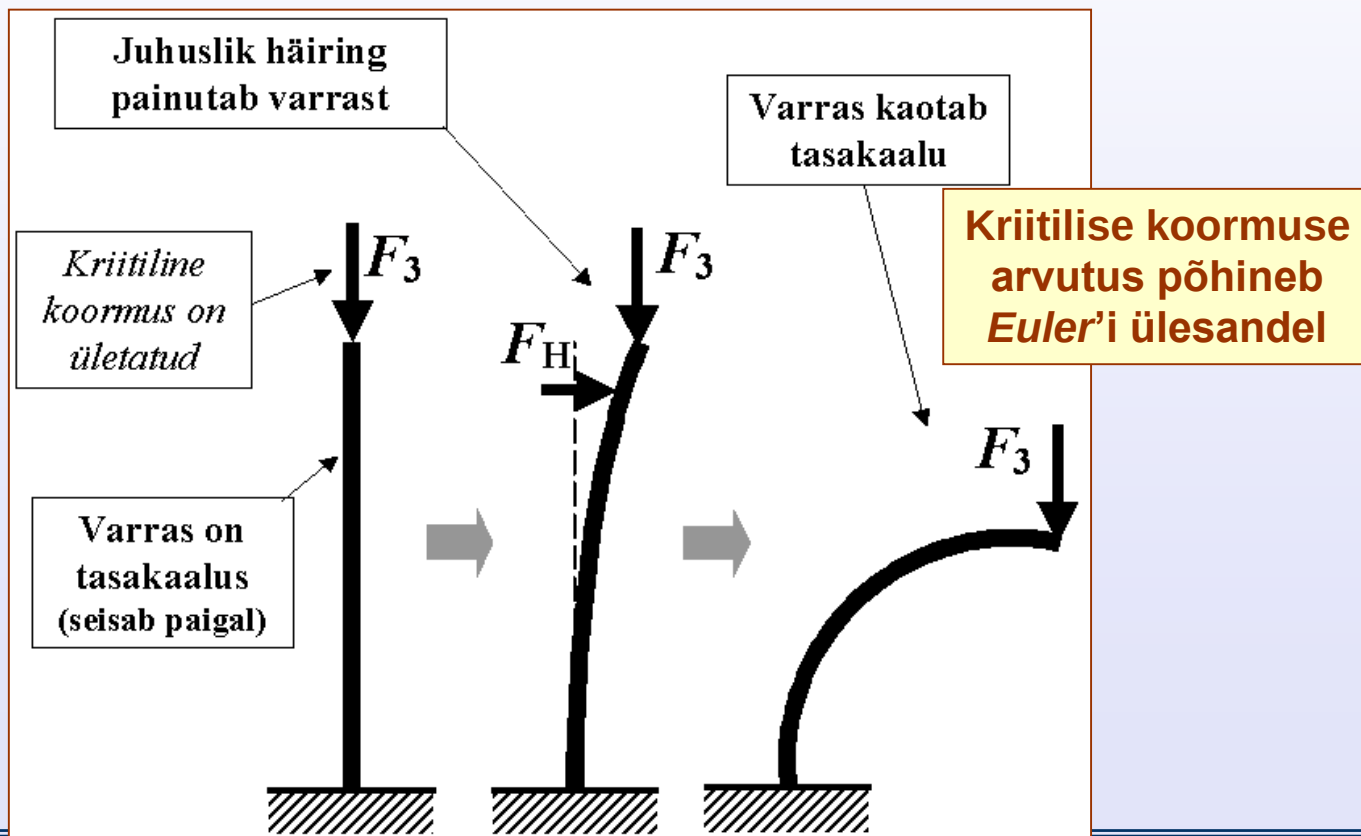
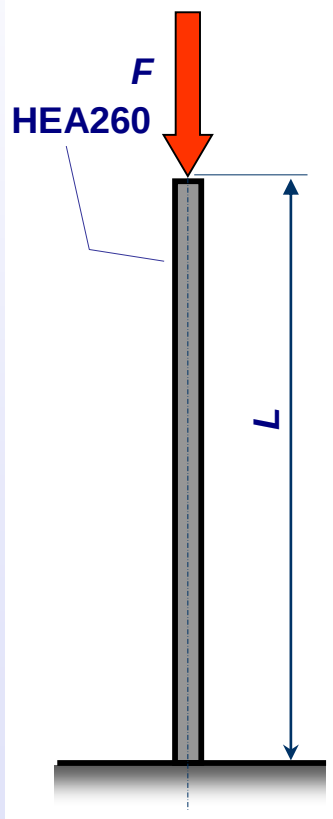
Varda suurim (ohtlik) saledus

$$\lambda = \lambda_{\max} = \frac{L_E}{i_{\min}} = \frac{8}{6,50 \cdot 10^{-2}} = 123,0 \approx \underline{123}$$

3. Varda lubatav koormus

3.1. Kriitilise koormuse olemus

Varda KRIITILINE KOORMUS = koormus, mille ületamise korral varda juhuslikule hälbele tasakaaluasendist teoreetiliselt järgneb varda stabiilsuse kadumine ja kiire purunemine



3.2. Kriitilise koormuse Euler'i valem

Kriitilise koormuse arvutus sõltub varda saledusest

Euler'i valem

Kui $\lambda \geq \lambda_E$, siis

$$F_{Cr} = A \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$$

Materjali
elastsusmoodul

Ristlõike pindala

Euler'i piirsaledus

Varda tegelik saledus

Materjali proportsionaalsuspiiri
hinnang survel

$$\sigma_P \cong 0,5\sigma_y$$

American Institute of Steel Construction (AISC)
praktiline soovitus, arvestab jääkpingeid kuumvaltsitud
terasprofiilis

Euler'i valemi kehtivustingimus

$$\sigma \leq \sigma_P$$

Varda
survepinge

Materjali
proportsionaalsupiir



Euler'i piirsaledus materjalile

$$\sigma_{Cr} = \sigma_P = \frac{F_{Cr}}{A} = \frac{\pi^2 E}{\lambda_E^2}$$

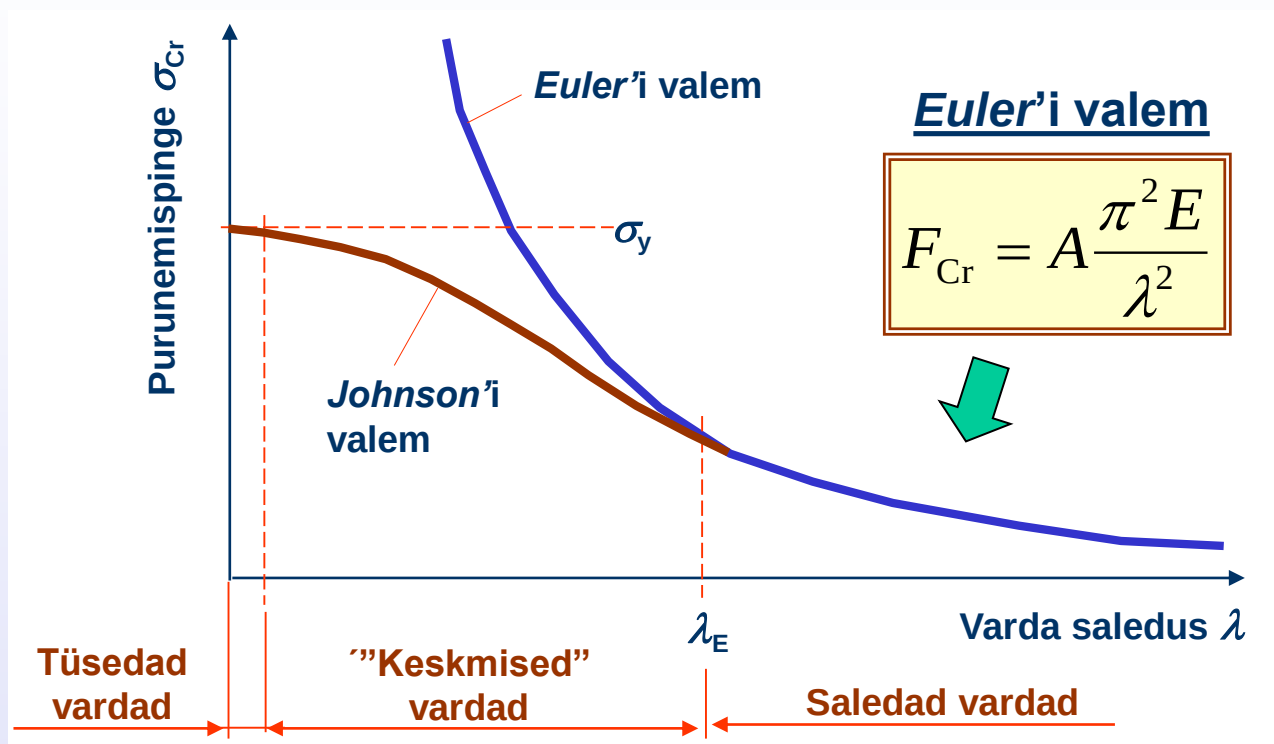
$$\lambda_E = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{\sigma_y}}$$

Kui varda saledus $\lambda > \lambda_E$, siis
varda survepinged $\sigma < \sigma_P$

3.3. Kriitilise koormuse valemi valik

Tüsedate varraste korral nõtke oht puudub ning tugevusarvutus tuleb teha survele

$$F_{Cr} = A\sigma_y$$



Euler'i valem

$$F_{Cr} = A \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$$

Johnson'i valem

$$F_{Cr} = A\sigma_y \left(1 - \sigma_y \frac{\lambda^2}{4\pi^2 E} \right)$$

Kui $\lambda < \lambda_E$, siis

3.4. Nõtkke praktiline piirkoormus

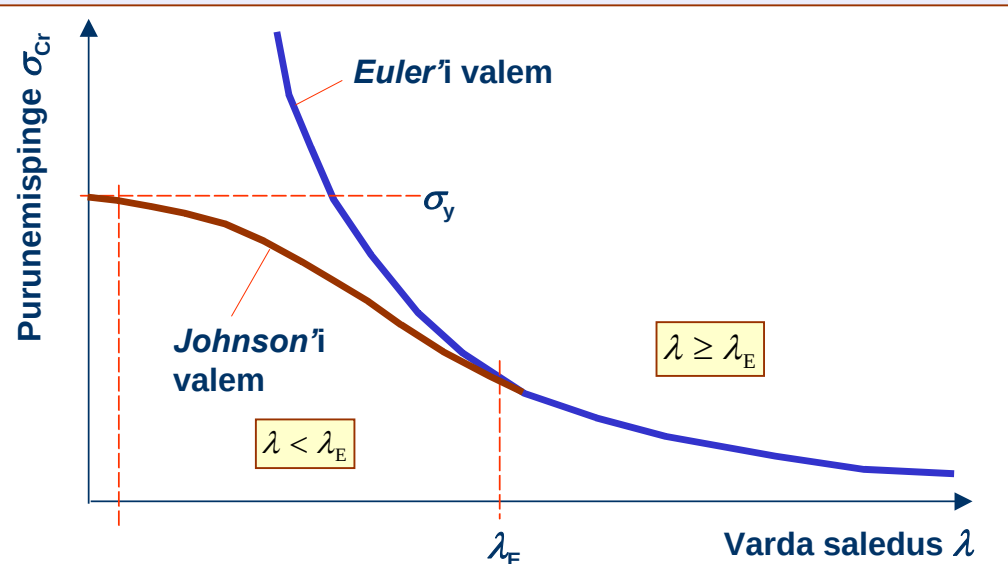
Katsetest on teada, et vardad nõtkuvad *Euler'i* ja *Johnson'i* kriitilistest koormustest väiksemate koormuste mõjudes



Nõtkke praktiline piirkoormus

$$F_{\text{Lim}} = \frac{F_{\text{Cr}}}{n}$$

Kriitilise koormuse
alanemise tegur



Kriitilise koormuse alanemise tegur

Kui $\lambda \geq \lambda_E$, siis $n = 1,92$

Kui $\lambda < \lambda_E$, siis

$$n = \frac{5}{3} + \frac{3\lambda}{8\lambda_E} - \frac{\lambda^3}{8\lambda_E^3}$$

American Institute of Steel Construction
(AISC) praktilised soovitused

Kirjanduses esineb metoodikaid,
kus kriitilise koormuse alanemise
tegurit ei kasutata

3.5. Nõtketegur (1)

Nõtketegur

$$\varphi = \frac{\sigma_{\text{Lim}}}{\sigma_y} = \frac{F_{\text{Lim}}}{A\sigma_y} = \frac{1}{n} \frac{F_{\text{Cr}}}{A\sigma_y}$$



$$F_{\text{Lim}} = \frac{F_{\text{Cr}}}{n} = \varphi A \sigma_y$$

Tegur, mis näitab kuimitu korda on nõtkepurunemisele vastav survepinge väiksem materjali voolepiirist surve

Kui $\lambda < \lambda_E$, siis

$$\varphi = \frac{1}{n} \left(1 - \sigma_y \frac{\lambda^2}{4\pi^2 E} \right) = \frac{1}{n} \left(1 - \frac{\lambda^2}{2\lambda_E^2} \right)$$

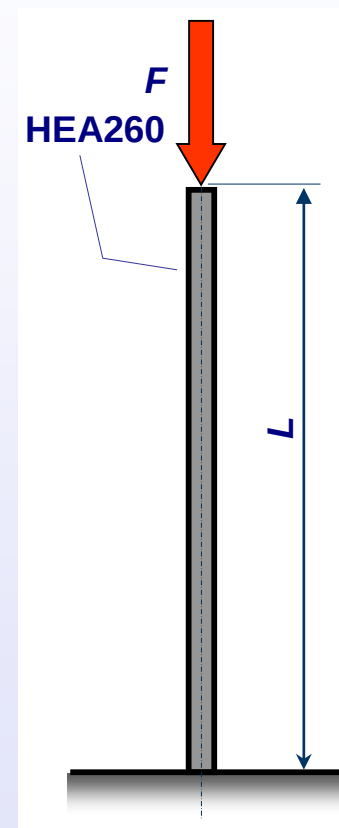
Kui $\lambda \geq \lambda_E$, siis

$$\varphi = \frac{1}{n} \frac{\pi^2 E}{\sigma_y \lambda^2} = \frac{1}{n} \frac{\lambda_E^2}{2\lambda^2}$$

Kui $\lambda < 10$, siis $\varphi \cong 1$

Nõtketeguri φ väärtus:

- on piirides $0 < \varphi \leq 1$
- sõltub saledusest
- sõltub materjalist



3.5. Nõtketegur (2)

Kirjanduses (venekeelses) on levinud ka nõtketegurite tabelid

Nõtketegur ϕ	Saledus λ																				
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Tavaterased	1.0	0.99	0.96	0.94	0.92	0.89	0.86	0.81	0.75	0.69	0.60	0.52	0.45	0.40	0.36	0.32	0.29	0.26	0.23	0.21	0.19
Hea C-teras	1.0	0.98	0.95	0.92	0.89	0.86	0.82	0.76	0.70	0.62	0.51	0.43	0.37	0.33	0.29	0.26	0.24	0.21	0.19	0.17	0.16
Kval. teras	1.0	0.97	0.95	0.91	0.87	0.83	0.79	0.72	0.65	0.55	0.43	0.35	0.3	0.26	0.23	0.21	0.19	0.17	0.15	0.14	0.13
Malm	1.0	0.97	0.91	0.81	0.69	0.57	0.44	0.34	0.26	0.20	0.16										
Puit	1.0	0.99	0.97	0.93	0.87	0.8	0.71	0.6	0.48	0.38	0.31	0.25	0.22	0.18	0.16	0.14	0.12	0.11	0.1	0.09	0.08

Erinevad nõtketeguri määramise meetodikad võivad anda erinevaid tulemusi

Tugevustingimus nõtkel:

$$F \leq \frac{F_{\text{Lim}}}{[S]} = \frac{\phi A \sigma_y}{[S]}$$

või

$$\sigma \leq \frac{F_{\text{Lim}}}{A[S]} = \frac{\phi \sigma_y}{[S]}$$

3.6. Lubatav koormus

Euler'i piirsaledus terasele S235

Varda ohtlik saledus

$$\lambda = 123$$

$$\lambda_E = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{\sigma_y}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot 210 \cdot 10^9}{235 \cdot 10^6}} = 132,8 \approx 133$$

Kriitilise koormuse alanemise tegur

Kuna $\lambda = 123 < \lambda_E = 133$, siis

$$n = \frac{5}{3} + \frac{3\lambda}{8\lambda_E} - \frac{\lambda^3}{8\lambda_E^3} = \frac{5}{3} + \frac{3 \cdot 123}{8 \cdot 133} - \frac{123^3}{8 \cdot 133^3} = 1,914 \approx 1,91$$

HEA260 ristlõike pindala (tabelist)

$$A = 86,8 \text{ cm}^2$$

Nõtketegur

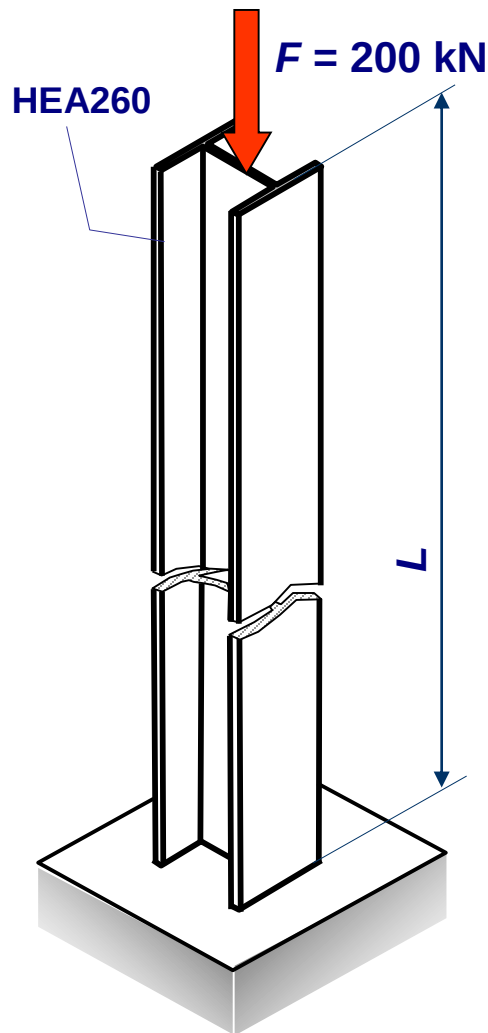
$$\varphi = \frac{1}{n} \left(1 - \frac{\lambda^2}{2\lambda_E^2} \right) = \frac{1}{1,91} \cdot \left(1 - \frac{123^2}{2 \cdot 133^2} \right) = 0,299 \approx 0,30$$

Vardale lubatav koormus

$$F \leq \frac{\varphi A \sigma_y}{[S]} = \frac{0,30 \cdot 86,8 \cdot 10^{-4} \cdot 235 \cdot 10^6}{2} = 305970 \text{ N} \approx \underline{\underline{305 \text{ kN}}}$$

4. Jätakuülesanne (1)

4.1. Ülesande püstitus



Arvutada samba suurim
lubatud kõrgus L

Arvestama peab surutud
detaili saledusest
tulenevat nõtkeohtu

Survekoormus: $F = 200 \text{ kN}$

Materjal: ehitusteras S235

Nõutav varutegur (piirkoormuse suhtes):
 $[s] = 2$

Materjali elastsusmoodul: $E = 210 \text{ GPa}$

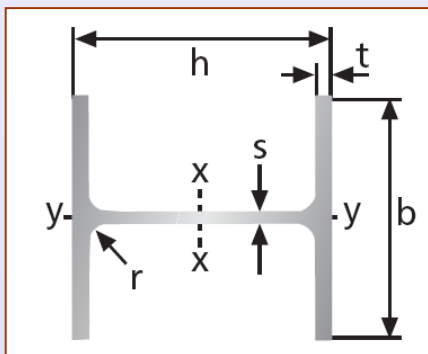
4.2. Varda ohtlik saledus

No	Mitat ja painot						Staattiset arvot							
	h	b	s	t	r	Vaippa	Poikki- pinta	Paino	I_x	W_x	i_x	I_y	W_y	i_y
	mm	mm	mm	mm	mm	m ² /m	cm ²	kg/m	cm ⁴	cm ³	cm	cm ⁴	cm ³	cm
260	250	260	7,5	12,5	24	1,48	86,8	68,2	10450	836	11,0	3670	282	6,50

Ristlõike vähim inertsiraadius

$$i_{\min} = \min(11,0; 6,50) = 6,50 \text{ cm}$$

Varras nõtkub telje y suhtes



Varda pikkuse redutseerimistegur

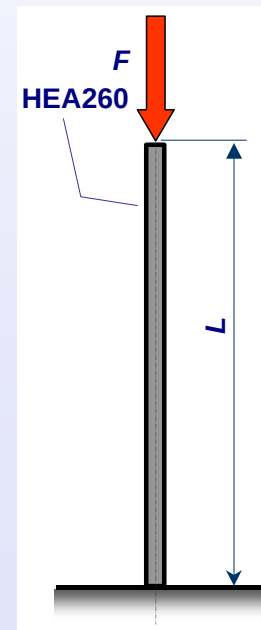
$$\mu = 2$$

Varda nõtkepikkus

$$L_E = \mu L = 2L$$

Varda ohtlik saledus

$$\lambda = \lambda_{\max} = \frac{L_E}{i_{\min}} = \frac{2 \cdot L}{6,50 \cdot 10^{-2}} = 30,76L \approx \underline{30,8L}$$



4.3. Varda pikkuse arvutamise metoodika

Varda ohtlik saledus

$$\lambda = 30,8L$$

Euler'i piirsaledus terasele S235

$$\lambda_E = 133$$

PROBLEEM: Teada ei ole varda tegelik saledus



Lihtsam on varda pikkus arvutada "proovimise" teel

1. Valida varda pikkus L

2. Arvutada varda saledus λ ja nõtketegur φ

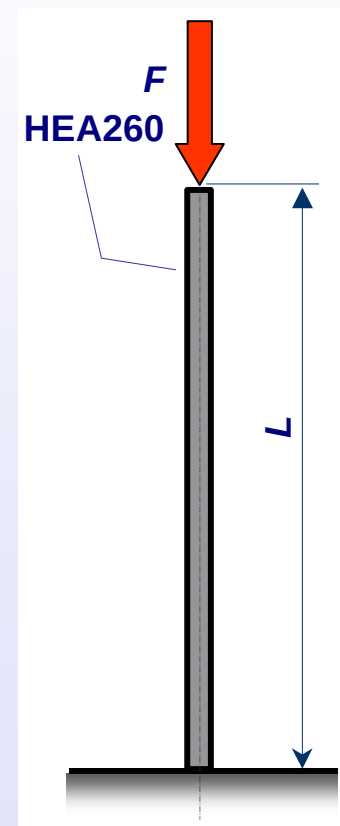
3. Arvutada nõtkete varutegur S

Ei

4. Kas tugevustingimus kehtib?

Ei

5. Kas tugevusvaru on vähim?



4.4. Varda kontroll nõtketele, kui $L = 5$ m

Varda ohtlik saledus

$$\lambda = 30,8L = 30,8 \cdot 5 = \underline{154}$$

Euler'i piirsaledus terasele S235

$$\lambda_E = 133$$

Kriitilise koormuse alanemise tegur

Kuna $\lambda = 154 > \lambda_E = 133$, siis $n = 1,92$

Nõtketegur

$$\varphi = \frac{1}{n} \frac{\lambda_E^2}{2\lambda^2} = \frac{1}{1,92} \cdot \frac{133^2}{2 \cdot 154^2} = 0,194 \approx 0,19$$

Nõtkete varutegur

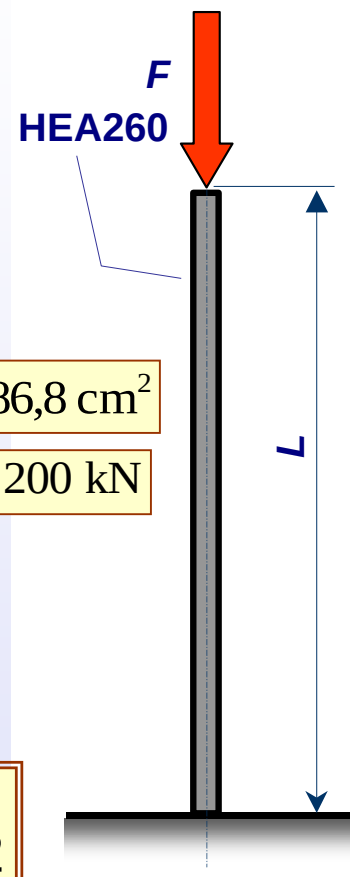
Tugevuskontroll nõtketele

$$S = \frac{F_{\text{Lim}}}{F} = \frac{\varphi A \sigma_y}{F} = \frac{0,19 \cdot 86,8 \cdot 10^{-4} \cdot 235 \cdot 10^6}{200 \cdot 10^3} = 1,93 \approx \underline{1,9} < [S] = 2$$

Varras kõrgusega 5 m EI OLE piisavalt stabiilne



Varda kõrgust tuleb vähendada



4.5. Varda kontroll nõtketele, kui $L = 4,8$ m

Varda ohtlik saledus

$$\lambda = 30,8L = 30,8 \cdot 4,8 = 147,8 \approx \underline{148}$$

Euler'i piirsaledus terasele S235

$$\lambda_E = 133$$

Kriitilise koormuse alanemise tegur

Kuna $\lambda = 148 > \lambda_E = 133$, siis $n = 1,92$

Nõtketegur

$$\varphi = \frac{1}{n} \frac{\lambda_E^2}{2\lambda^2} = \frac{1}{1,92} \cdot \frac{133^2}{2 \cdot 148^2} = 0,210 \approx 0,21$$

Nõtkete varutegur

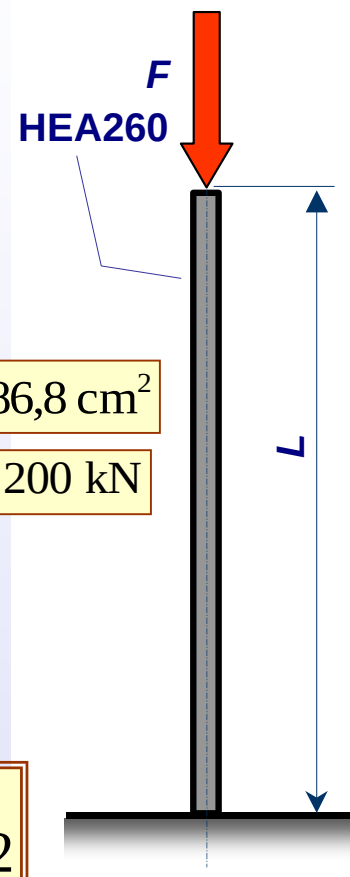
Tugevuskontroll nõtketele

$$S = \frac{F_{\text{Lim}}}{F} = \frac{\varphi A \sigma_y}{F} = \frac{0,21 \cdot 86,8 \cdot 10^{-4} \cdot 235 \cdot 10^6}{200 \cdot 10^3} = 2,14 \approx \underline{2,1} \geq [S] = 2$$

Varras kõrgusega 4,8 m ON stabiilne



Varda kõrgust võiks suurendada



4.6. Varda kontroll nõtketele, kui $L = 4,9$ m

Varda ohtlik saledus

$$\lambda = 30,8L = 30,8 \cdot 4,9 = 150,9 \approx \underline{151}$$

Euler'i piirsaledus terasele S235

$$\lambda_E = 133$$

Kriitilise koormuse alanemise tegur

Kuna $\lambda = 151 > \lambda_E = 133$, siis $n = 1,92$

Nõtketegur

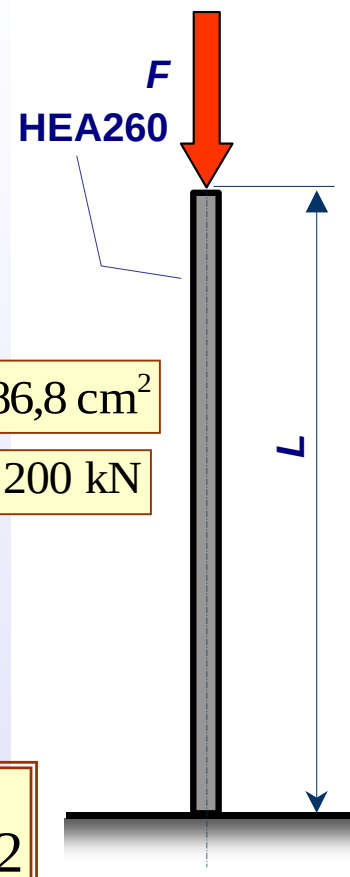
$$\varphi = \frac{1}{n} \frac{\lambda_E^2}{2\lambda^2} = \frac{1}{1,92} \cdot \frac{133^2}{2 \cdot 151^2} = 0,202 \approx 0,20$$

Nõtkete varutegur

Tugevuskontroll nõtketele

$$S = \frac{F_{\text{Lim}}}{F} = \frac{\varphi A \sigma_y}{F} = \frac{0,20 \cdot 86,8 \cdot 10^{-4} \cdot 235 \cdot 10^6}{200 \cdot 10^3} = 2,03 \approx \underline{2,0} \geq [S] = 2$$

Varras kõrgusega 4,9 m ON stabiilne ja optimaalne



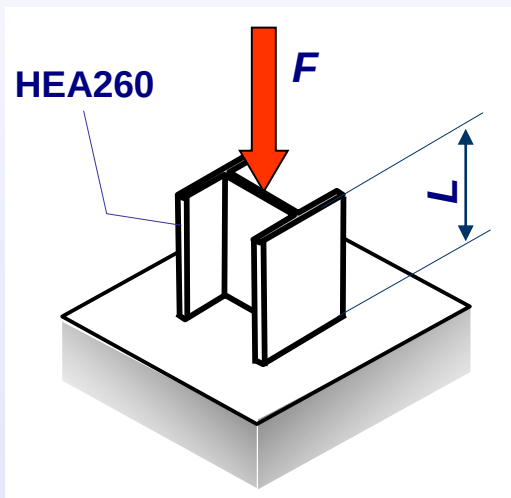
$$A = 86,8 \text{ cm}^2$$

$$F = 200 \text{ kN}$$

5. Jätakuülesanne (2)

5.1. Ülesande püstitus

Arvutada sambale suurim lubatav koormus F , kui sammas on tüse



Nõtkeohtu ilmselt arvestama ei pea

Materjal: ehitusteras S235
Nõutav varutegur: $[s] = 2$

5.2. Tüsedä varda pikkus

No	Mitat ja painot						Staattiset arvot							
	h	b	s	t	r	Vaippa	Poikki- pinta	Paino	I_x	W_x	i_x	I_y	W_y	i_y
	mm	mm	mm	mm	mm	m ² /m	cm ²	kg/m	cm ⁴	cm ³	cm	cm ⁴	cm ³	cm
260	250	260	7,5	12,5	24	1,48	86,8	68,2	10450	836	11,0	3670	282	6,50

Ristlõike vähim inertsiraadius

$$i_{\min} = \min(11,0; 6,50) = 6,50 \text{ cm}$$

Varda pikkuse redutseerimistegur

$$\mu = 2$$

Tüsedä varda nõtketegur

$$\lambda = \lambda_{\max} = 10$$

Varda nõtkepikkus

$$L_E = \mu L = 2L$$

Tüsedä varda pikkus

$$L = \frac{L_E}{\mu} = \frac{\lambda_{\max} i_{\min}}{\mu} = \frac{10 \cdot 6,5 \cdot 10^{-2}}{2} = 0,325 \approx \underline{0,3 \text{ m}}$$

5.3. Vardale lubatav koormus

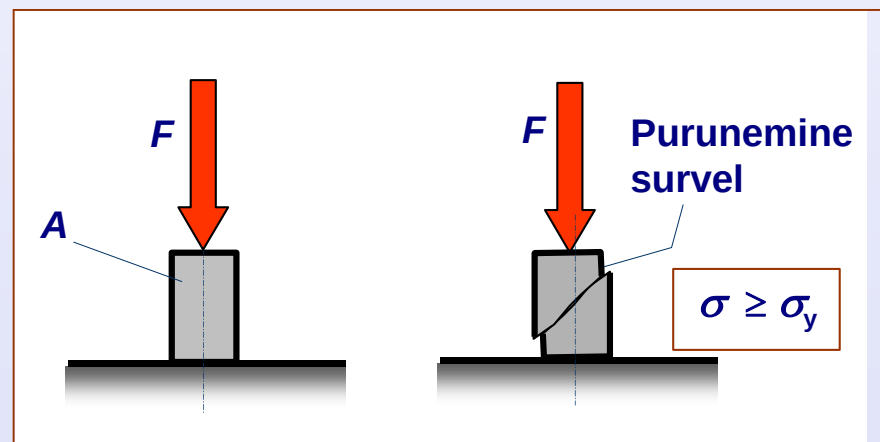
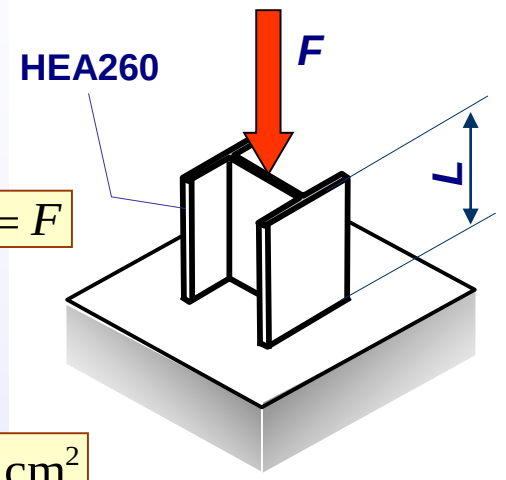
Kuna varras on TÜSE, on selle piirseisundiks voolavus

Tugevustingimus survel

$$S = \frac{\sigma_y}{\sigma} = \frac{A\sigma_y}{F} \geq [S]$$

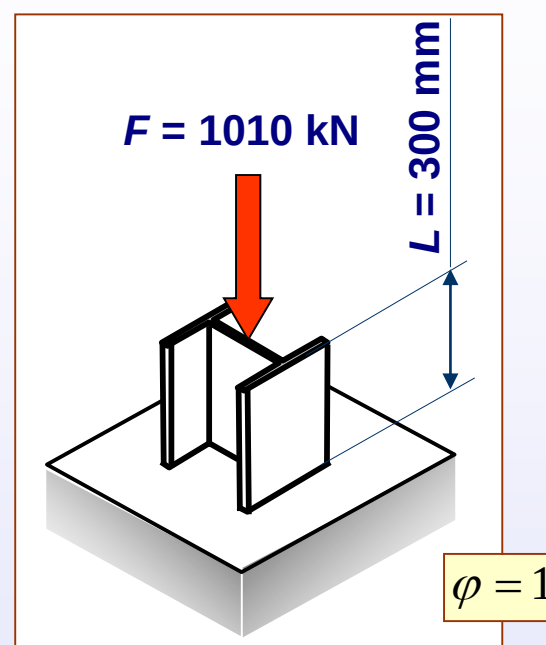
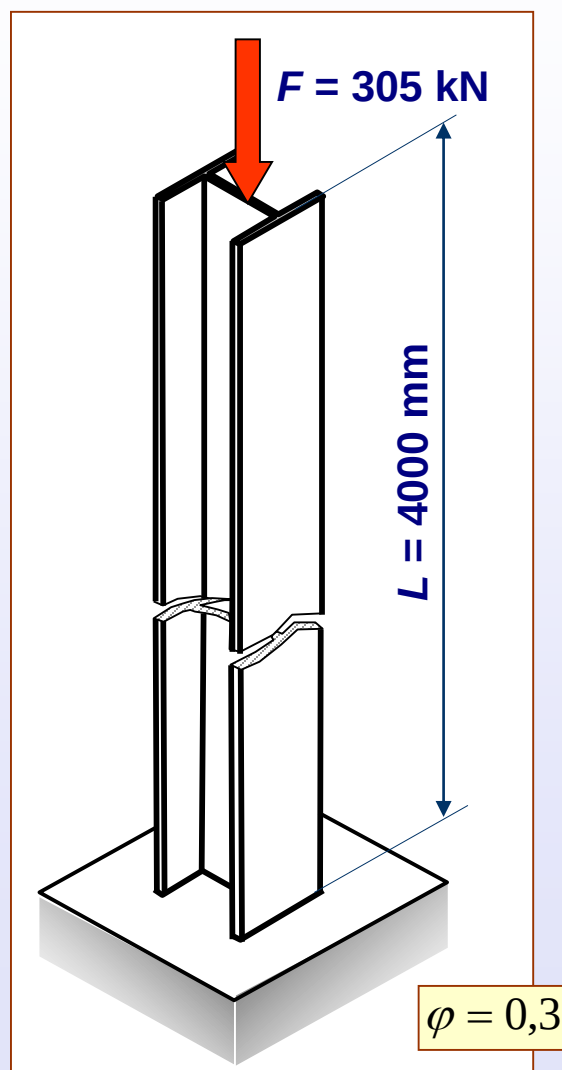
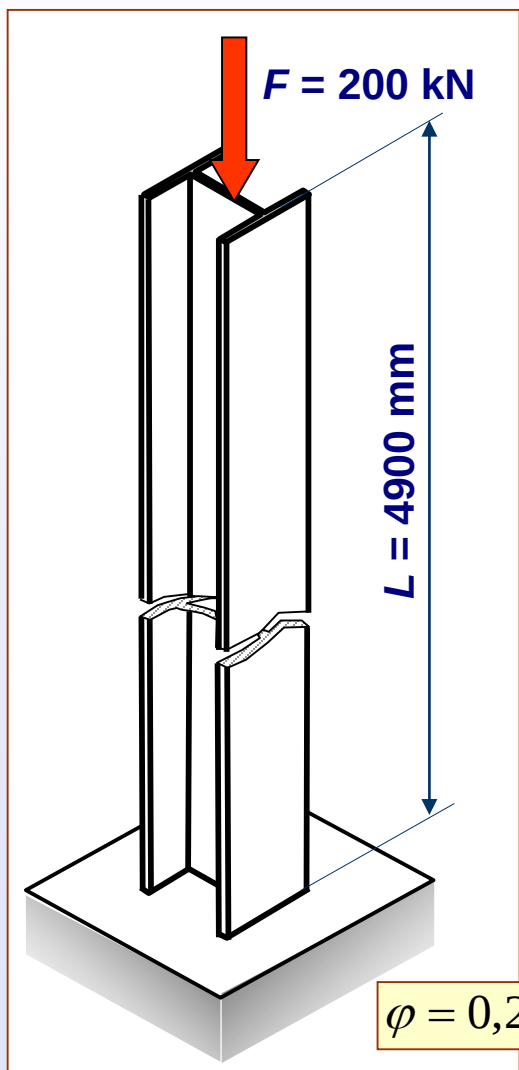


$$F \leq \frac{A\sigma_y}{[S]} = \frac{86,8 \cdot 10^{-4} \cdot 235 \cdot 10^6}{2} = 1019,9 \cdot 10^3 \text{ N} \approx \underline{1010 \text{ kN}}$$



6. Tulemused

HEA260 profiiliga sambad



Materjal: ehitusteras S235
Varutegur $[s] = 2$