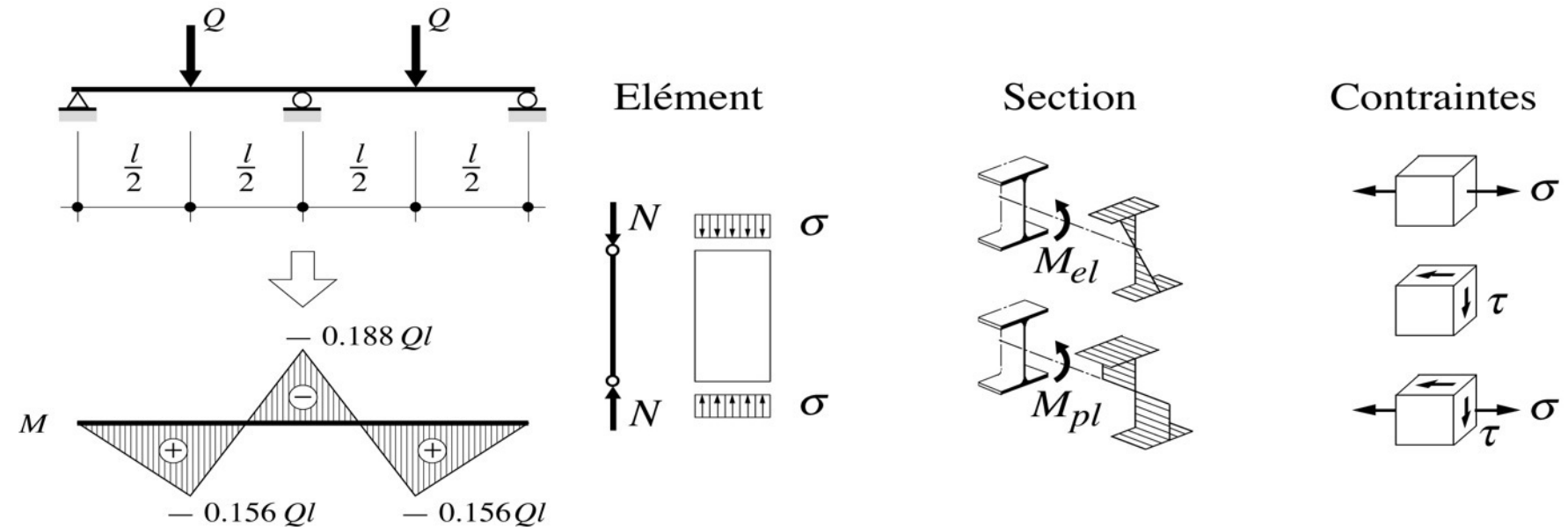


Cours structures en métal

TGC 10, chapitres 2 et 5:
Classes de section

Rappel, Fig. 2.24: Niveaux de calcul de la résistance

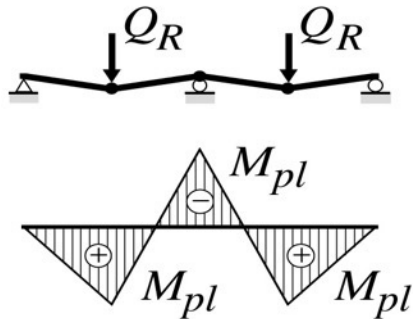
Calcul élastique des efforts intérieurs



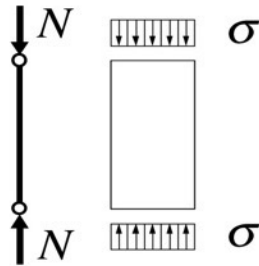
Rappel, Fig. 2.24: Niveaux de calcul de la résistance

Calcul plastique des efforts intérieurs

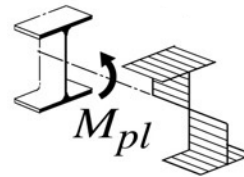
Mécanisme de ruine



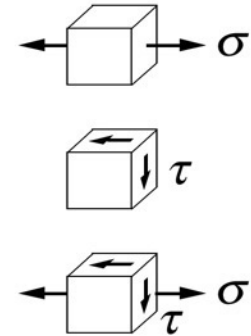
Élément



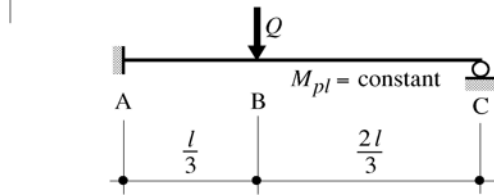
Section



Contraintes



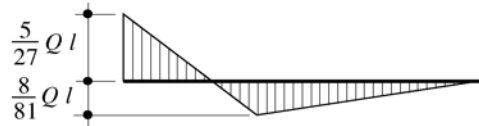
TGC 11, Fig. 11.17: analyse d'une poutre hyperstatique



Système statique de départ

Hyperstaticité : $n_0 = 1$

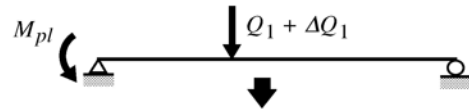
Détermination des rotations



Première rotule en A quand :

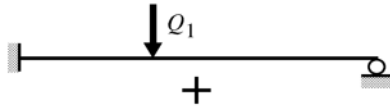
$$M_A = \frac{5}{27} Q_1 l = M_{pl} \quad \text{d'où} : Q_1 = \frac{27}{5} \frac{M_{pl}}{l} = 5.4 \frac{M_{pl}}{l}$$

$$\text{Flèche verticale en B} : w_1 = 0.00503 \frac{Q_1 l^3}{EI} = 0.0271 \frac{M_{pl} l^2}{EI}$$



Nouveau système statique

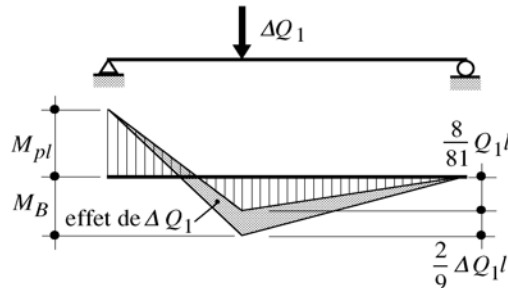
Hyperstaticité : $n_1 = n_0 - 1 = 0 \Rightarrow$ Système isostatique



Deuxième rotule en B quand :

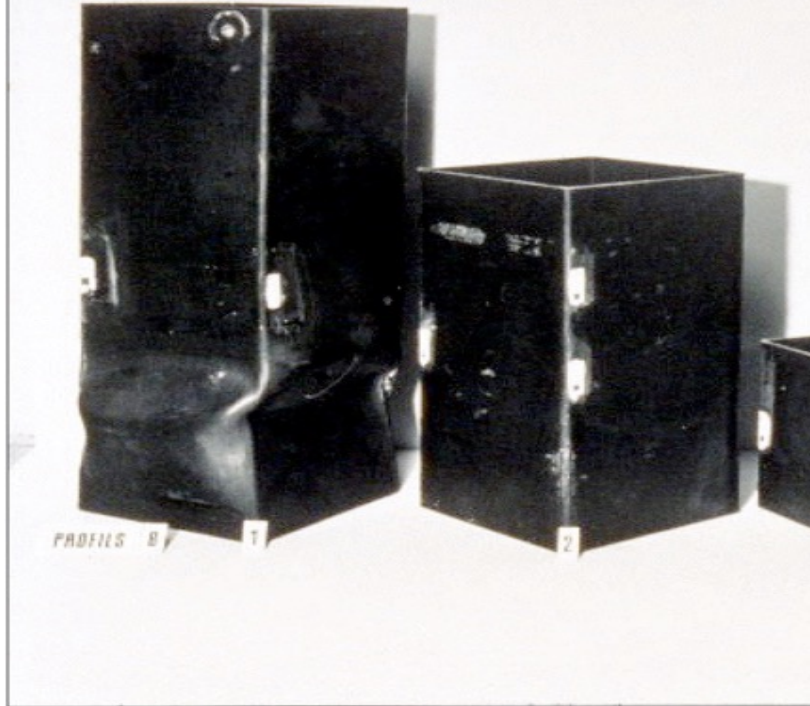
$$M_B = \frac{8}{81} Q_1 l + \frac{2}{9} \Delta Q_1 l = M_{pl} \quad \text{d'où} : \Delta Q_1 = 2.1 \frac{M_{pl}}{l}$$

$$\text{Augmentation de flèche} : \Delta w_1 = 0.0165 \frac{\Delta Q_1 l^3}{EI} = 0.0346 \frac{M_{pl} l^2}{EI}$$



ELU: Phénomène de voilement et influence sur analyse structurale et dimensionnement

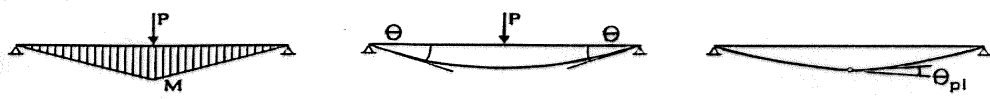
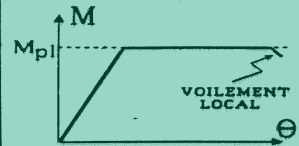

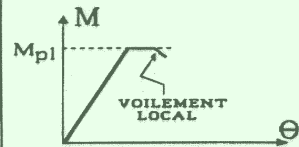

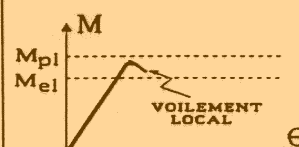

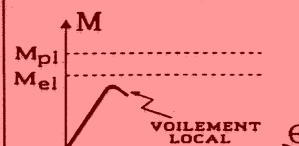

Tube carré en compression



Poutre en double té sous flexion positive, voilement de l'aile supérieure



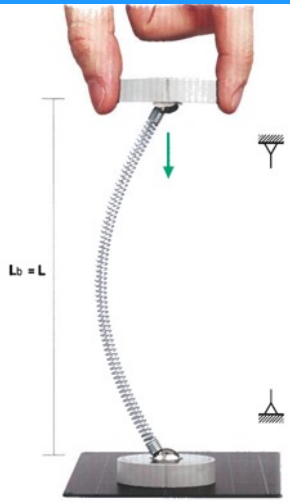
ELU: Critères de classification des sections

			
CLASSE	MODELE DE COMPORTEMENT	RESISTANCE DE CALCUL	CAPACITE DE ROTATION PLASTIQUE
1		PLASTIQUE sur section complète  f_y	Importante
2		PLASTIQUE sur section complète  f_y	Limitée
3		ELASTIQUE sur section complète  f_y	Aucune
4		ELASTIQUE sur section efficace  f_y	Aucune

PP

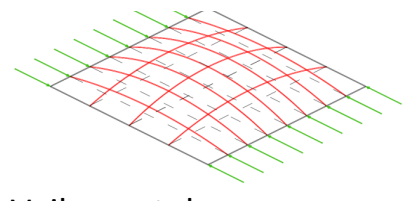
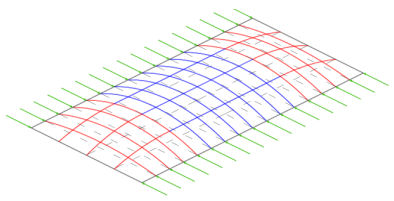
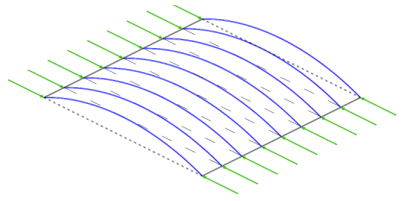
EP

EE

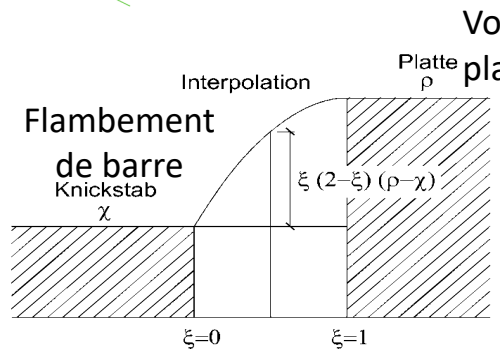
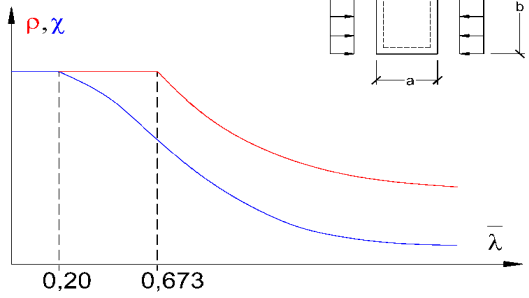


Plaques: comportements par rapport à une barre articulée

Flambement (c) Voilement proche du flambement Voilement (p)



Facteur de réduction résistance



Voilement de plaque

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1 \quad \text{jedoch} \quad 0 \leq \xi \leq 1,0$$

$$\rho_c = (\rho_p - \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi) + \chi_c$$

Pour déterminer $\sigma_{cr,p} / \sigma_{cr,c}$ dans une direction, ne pas prendre en considération le chargement dans la direction perpendiculaire !

f is the interpolation function for the determination of plate-like and column-like behaviour.

$$f = V \cdot (\ln(\xi + 1))^P \text{ but } 0 \leq f \leq 1 \quad (6.22b)$$

Where ξ is the weighting factor of the respective plate and column behaviours, defined as $\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1$ but $\xi \geq 0$

$\sigma_{cr,p}$ is the elastic critical plate buckling stress;

$\sigma_{cr,c}$ is the elastic critical column buckling stress according to 6.4.2(3) and 6.5.3(3), respectively for unstiffened and stiffened plates;

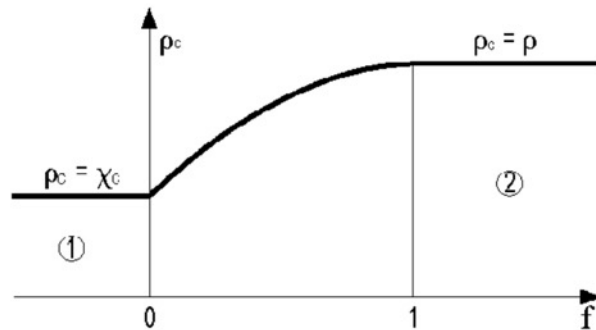
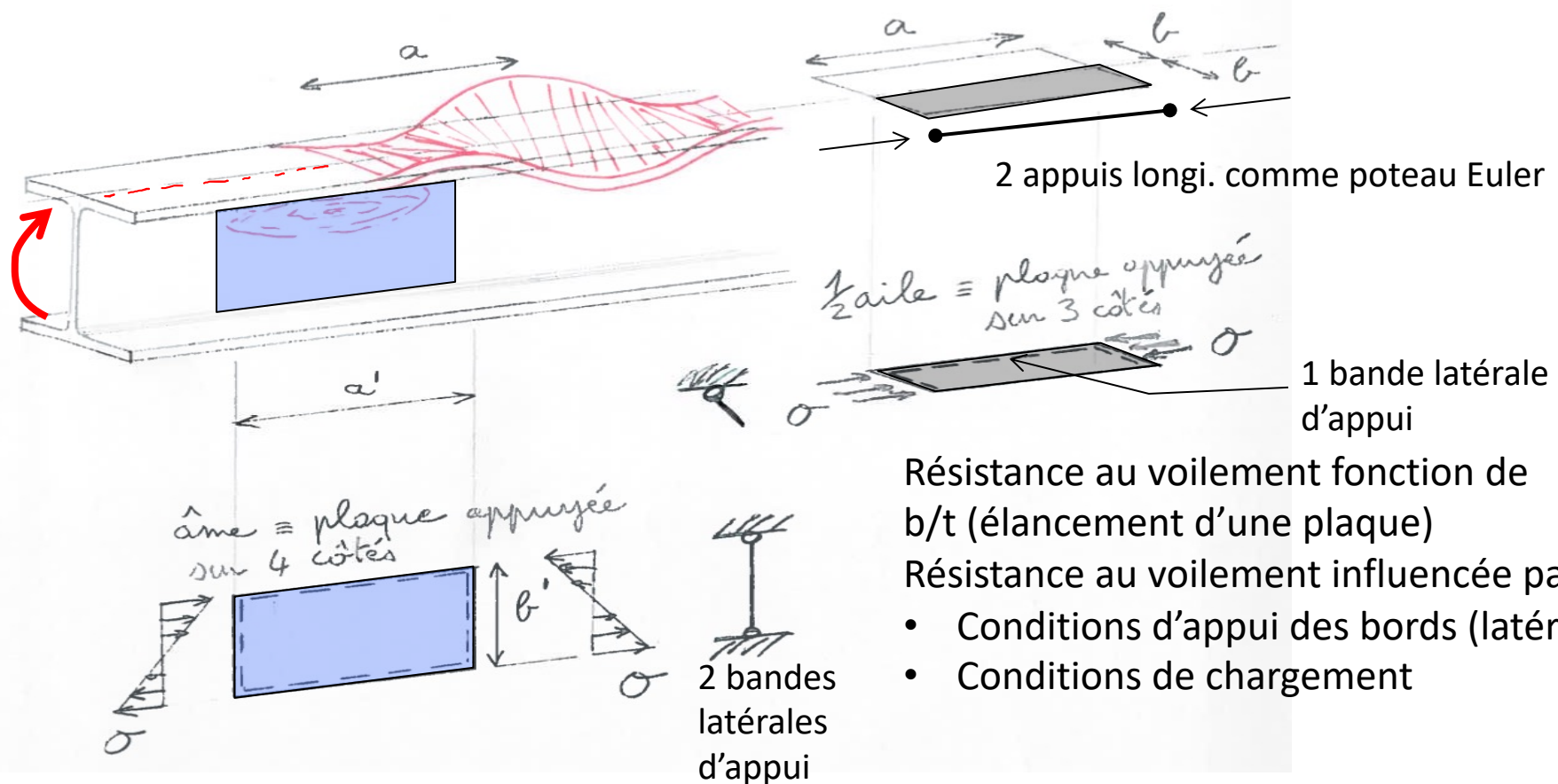


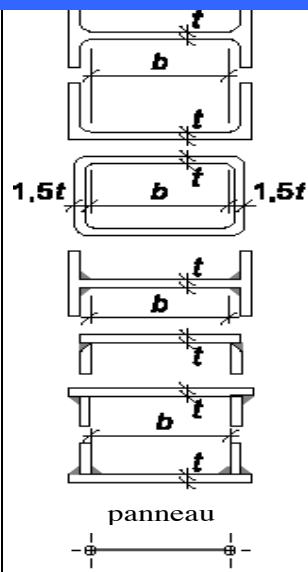

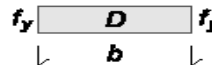
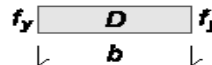
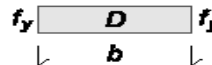
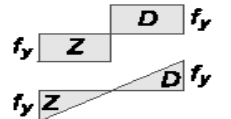
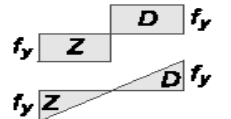
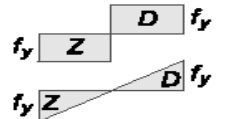
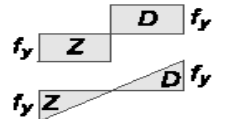
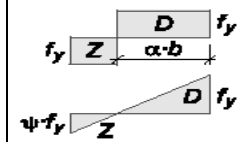
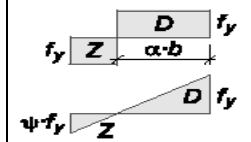
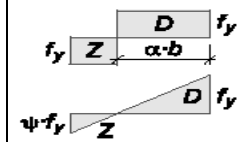
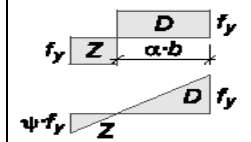
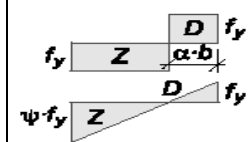
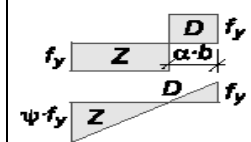
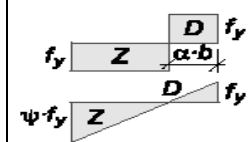
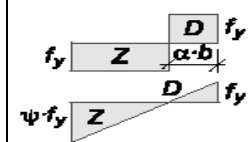
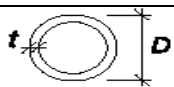
Figure 6.8 — Interpolation between plate (2) and column (1) buckling

Voilement: phénomène et décomposition d'une section en plaques



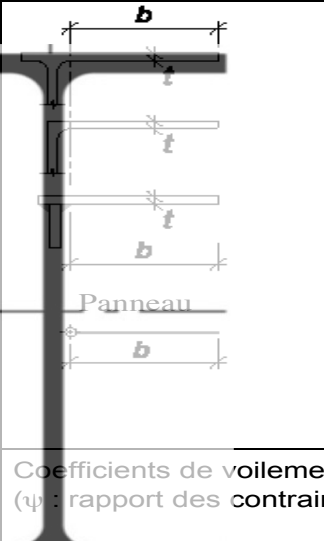

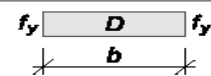
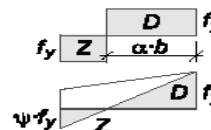
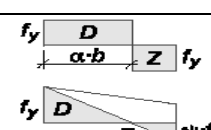
ELU: Critères d'élancement pour éviter le voilement (SIA 263)

Tableau 5a: Critères d'élancement pour éléments plans appuyés aux deux bords

Géométrie	Mode de sollicitation	Elancement limite b/t maximal		
		Classe de section 1	Classe de section 2	Classe de section 3
<div>Âme du profilé</div> 	 Compression	 33ϵ	 38ϵ	 42ϵ
	 Flexion Simple	 72ϵ	 83ϵ	 124ϵ
	 Compression avec flexion $\psi > -1$ (Compression +)	 $\frac{396\epsilon}{13\alpha - 1}$ $\alpha \geq 0,5$	 $\frac{456\epsilon}{13\alpha - 1}$ $\alpha \geq 0,5$	 $\frac{42\epsilon}{0,67 + 0,33\psi}$
	 Traction avec flexion $\psi \leq -1$ (Compression +)	 $\frac{36\epsilon}{\alpha}$ $\alpha \leq 0,5$	 $\frac{41,5\epsilon}{\alpha}$ $\alpha \leq 0,5$	 $62\epsilon(1 - \psi)\sqrt{-\psi}$
Cas particulier Tubes	 Flexion et/ou compression	$\frac{D}{t} \leq 50\epsilon^2$	$\frac{D}{t} \leq 70\epsilon^2$	$\frac{D}{t} \leq 90\epsilon^2$

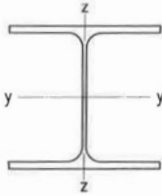
ELU: Critères d'élancement pour éviter le voilement (SIA 263)

Tableau 5b: Critères d'élancement pour éléments plans en porte-à-faux

Géométrie	Sollicitation		Elancement limite b/t maximal		
<div>Aile du profilé</div> 			Classe de section 1	Classe de section 2	Classe de section 3
	Compression		9 ε	10 ε	14 ε
	Compression avec flexion, bord libre comprimé		$\frac{9\varepsilon}{\alpha}$	$\frac{10\varepsilon}{\alpha}$	$21\varepsilon \sqrt{k_1}$
	Compression avec flexion, bord libre tendu		$\frac{9\varepsilon}{\alpha^{1.5}}$	$\frac{10\varepsilon}{\alpha^{1.5}}$	$21\varepsilon \sqrt{k_2}$
Coefficients de voilement k ₁ et k ₂ : (ψ : rapport des contraintes)		$k_1 = 0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$ $k_2 = 0,578 / (0,34 + \psi)$ $k_2 = 1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$	pour $1 \geq \psi \geq -3$ pour $1 \geq \psi \geq 0$ (compression positive) pour $0 \geq \psi \geq -1$		
Facteur de réduction pour les aciers à plus haute limite d'élasticité (par rapport à S235, où ε = 1,0):		$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$			S275: ε = 0,924 S355: ε = 0,814 S460: ε = 0,715

ELU: Contrôle critères d'élançement pour éviter le voilement

METHODE POUR PROFILES: Utilisation table SZS C5, onglet profil

HEA	Breitflanschträger HEA	Profils à larges ailes HEA
	$A_v = A - 2bt_f + (t_w + 2r) t_f$ $A_w = (h - t_f) \cdot t_w$ $S_y = \frac{1}{2} W_{ply}$ $S_z = \frac{1}{2} W_{plz}$	Maximale Lagerlängen / Longueurs maximales en stock: $h \leq 180 \quad 18 \text{ m}$ $h \geq 200 \quad 24 \text{ m}$ EN 10365:2017 Andere Bezeichnungen } DIE, IPBI Autres désignations }
	$W_{ely} = \frac{I_y}{h/2}$ $\bar{W}_y = \frac{I_y}{(h - t_f)/2}$ $W_{elz} = \frac{I_z}{b/2}$	
	Falls bei reiner Biegung nicht mit Verfahren PP gerechnet werden darf, sind folgende Verfahren anzuwenden: Si en cas de flexion pure la méthode PP ne peut pas être utilisée, les procédures suivantes doivent être utilisées: S355: \triangle EP \blacktriangle EE S460: \circ EP \bullet EE \odot EER	Bei Druckbeanspruchung ist örtliches Beulen zu beachten für: En cas de sollicitation par compression, le voilement local doit être pris en compte pour: • S460 und höher/nuance S460 ou plus élevée † S355 und höher/nuance S355 ou plus élevée ‡ alle Stähle/toutes les nuances d'acier

HEA	m kg/m	Statische Werte / Valeurs statiques												
		A mm ²	A _v mm ²	A _w mm ²	I _y mm ⁴	W _{ely} mm ³	W _y mm ³	W _{ply} mm ³	i _y mm	I _z mm ⁴	W _{elz} mm ³	W _{plz} mm ³	i _z mm	K = I _x mm ⁴
					x 10 ⁶	x 10 ³	x 10 ³	x 10 ³		x 10 ⁶	x 10 ³	x 10 ³		x 10 ⁶
100	16,7	2120	756	440	3,49	72,8	79	83,0	40,6	1,34	26,8	41,2	25,1	0,0520
120	19,9	2530	846	530	6,06	106	114	119	48,9	2,31	38,5	58,9	30,2	0,0596
140	24,7	3140	1012	685	10,3	155	166	173	57,3	3,89	55,6	84,8	35,2	0,0803
160	30,4	3880	1321	858	16,7	220	234	245	65,7	6,16	76,9	118	39,8	0,118
180	35,5	4530	1447	969	25,1	294	311	325	74,5	9,25	103	157	45,2	0,147
200	42,3	5380	1808	1170	36,9	389	410	429	82,8	13,4	134	204	49,8	0,204
220	50,5	6430	2067	1390	54,1	515	544	568	91,7	19,5	178	271	55,1	0,281
240	60,3	7680	2518	1640	77,6	675	712	745	101	27,7	231	352	60,0	0,410
260	68,2	8680	2876	1780	104,5	836	881	920	110	36,7	282	430	65,0	0,520
280	76,4	9730	3174	2060	136,7	1010	1060	1110	119	47,6	340	518	70,0	0,614
300	88,3	11300	3728	2350	182,6	1260	1320	1380	127	63,1	421	641	74,9	0,842
320	97,6	12400	4113	2650	229,3	1480	1560	1630	136	69,9	466	710	74,9	1,09
340	105	13300	4495	2980	276,9	1680	1770	1850	144	74,4	496	756	74,6	1,29
360	112	14300	4896	3320	330,9	1890	1990	2090	152	78,9	526	802	74,3	1,51
400	125	15900	5733	4080	450,7	2310	2430	2560	168	85,6	571	873	73,4	1,91
450	140	17800	6578	4820	637,2	2900	3040	3220	189	94,7	631	966	72,9	2,49
500	155	19800	7472	5600	869,7	3550	3730	3950	210	103,7	691	1060	72,4	3,18
550	166	21200	8372	6450	1119	4150	4340	4620	230	108,2	721	1110	71,5	3,61
600	178	22600	9321	7340	1412	4790	5000	5350	250	112,7	751	1160	70,5	4,08
650	190	24200	10320	8290	1752	5470	5710	6140	269	117,2	782	1200	69,7	4,59
700	204	26000	11700	9610	2153	6240	6490	7030	288	121,8	812	1260	68,4	5,23
800	224	28600	13880	11400	3034	7680	7960	8700	326	126,4	843	1310	66,5	6,10
900	252	32100	16330	13800	4221	9480	9820	10800	363	135,5	903	1410	65,0	7,51
1000	272	34700	18460	15800	5538	11190	11550	12800	400	140,0	934	1470	63,5	8,37

ELU: Contrôle critères d'élançement pour éviter le voilement sous N + M

METHODE POUR PROFILES:

Utilisation table SZS C5, 1^{er} onglet

Application des méthodes de calcul PP et

EP: On se référera aux tableaux 5a et 5b de la norme SIA 263.

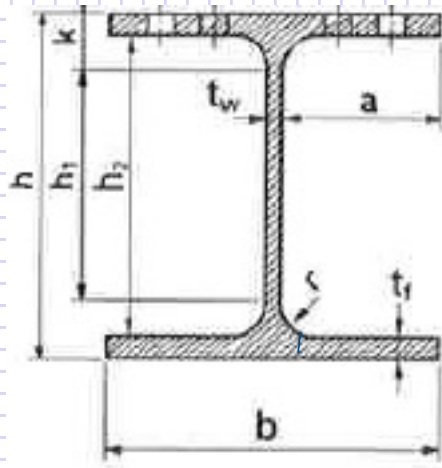
Elançement des sections:

Les valeurs de n indiquent le maximum de l'effort normal combiné avec un moment fléchissant et permettant une plastification complète de la section pour la méthode PP resp. EP.

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}}$$

IPE	m kg/m	I_y -10 ⁶ mm ⁴	Hilfswerte Valeurs auxiliaires		S355				Verfahren	
			a	ξ	Querschnittswiderstände Résistances des sections ①				Méthode	
					N _{Rd}	V _{Rd}	M _{y,Rd}	M _{z,Rd}	PP	EP
					kN	kN	kNm	kNm	erlaubt für permise avec n ≤	n ≤
80	6,0	0,80	0,37	1,23	257	70	7,84	1,96	1,0	1,0
100	8,1	1,71	0,39	1,24	348	99	13,3	3,11	1,0	1,0
120	10,4	3,18	0,39	1,24	446	123	20,5	4,60	1,0	1,0
140	12,9	5,41	0,39	1,24	554	149	29,9	6,53	1,0	1,0
160	15,8	8,69	0,40	1,25	680	189	41,9	8,82	1,0	1,0
180	18,8	13,2	0,39	1,24	808	221	56,1	11,7	0,31	1,0
200	22,4	19,4	0,40	1,25	964	273	74,7	15,1	0,28	1,0
220	26,2	27,7	0,39	1,25	1129	310	96,4	19,6	0,25	1,0
240	30,7	38,9	0,40	1,25	1322	373	124,1	25,0	0,23	1,0
270	36,1	57,9	0,40	1,25	1552	431	163,6	32,8	0,20	0,27
300	42,2	83,6	0,40	1,25	1819	502	212,3	42,3	0,19	0,26
330	49,1	117,7	0,41	1,26	2116	601	271,8	52,1	0,17	0,24
360	57,1	162,7	0,41	1,25	2458	685	344,5	64,6	0,16	0,22
400	66,3	231,3	0,42	1,27	2857	834	441,9	77,4	0,15	0,21
450	77,6	337,4	0,44	1,28	3340	994	575,4	93,3	0,14	0,21
500	90,7	482,0	0,45	1,29	3905	1169	741,8	113,6	0,13	0,20
550	106	671,2	0,46	1,30	4544	1412	942,3	135,6	0,13	0,20
600	122	920,8	0,46	1,30	5274	1636	1187	164,3	0,12	0,19
750x134	134	1507	0,52	1,35	5768	1866*	1570	192,7	N	0,07
750x147	147	1661	0,52	1,35	6339	2050*	1728	213,3	0,05	0,12
750x173	173	2058	0,48	1,31	7482	2265*	2102	273,9	0,09	0,16
750x196	196	2403	0,46	1,30	8479	2480	2425	324,2	0,12	0,19
HEA										
100	16,7	3,49	0,25	1,14	717	148	28,1	13,9	1,0	1,0
120	19,9	6,06	0,24	1,14	855	165	40,4	19,9	1,0	1,0
140	24,7	10,3	0,24	1,14	1062	198	58,7	28,7	1,0	1,0
160	30,4	16,7	0,26	1,15	1312	258	82,9	39,8	1,0	1,0
180	35,5	25,1	0,25	1,14	1532	283	109,8	52,9	N	1,0
200	42,3	36,9	0,26	1,15	1819	353	145,2	68,9	N	1,0
220	50,5	54,1	0,25	1,14	2174	404	192,2	91,5	N	1,0
240	60,3	77,6	0,25	1,14	2597	492	251,7	118,9	N	1,0
260	68,2	104,5	0,25	1,14	2935	348	282,8	95,4	N	N
280	76,4	136,7	0,25	1,14	3290	401	342,5	115,0	N	N
300	88,3	182,6	0,25	1,15	3804	458	426,0	142,2	N	N
320	97,6	229,3	0,25	1,14	4206	803	550,4	239,9	N	1,0

Exemple de détermination de classe de section



Exemple 2 de détermination de classe de section

HEA 280, **S355**

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,814$$

Ailes : $\frac{b}{t} = 8,6$ Pas de changement

Limite classe 1: $9\varepsilon = 9 \cdot 0,814 = 7,3 < 8,6$ KO

Limite classe 2: $10\varepsilon = 10 \cdot 0,814 = 8,1 < 8,6$ KO

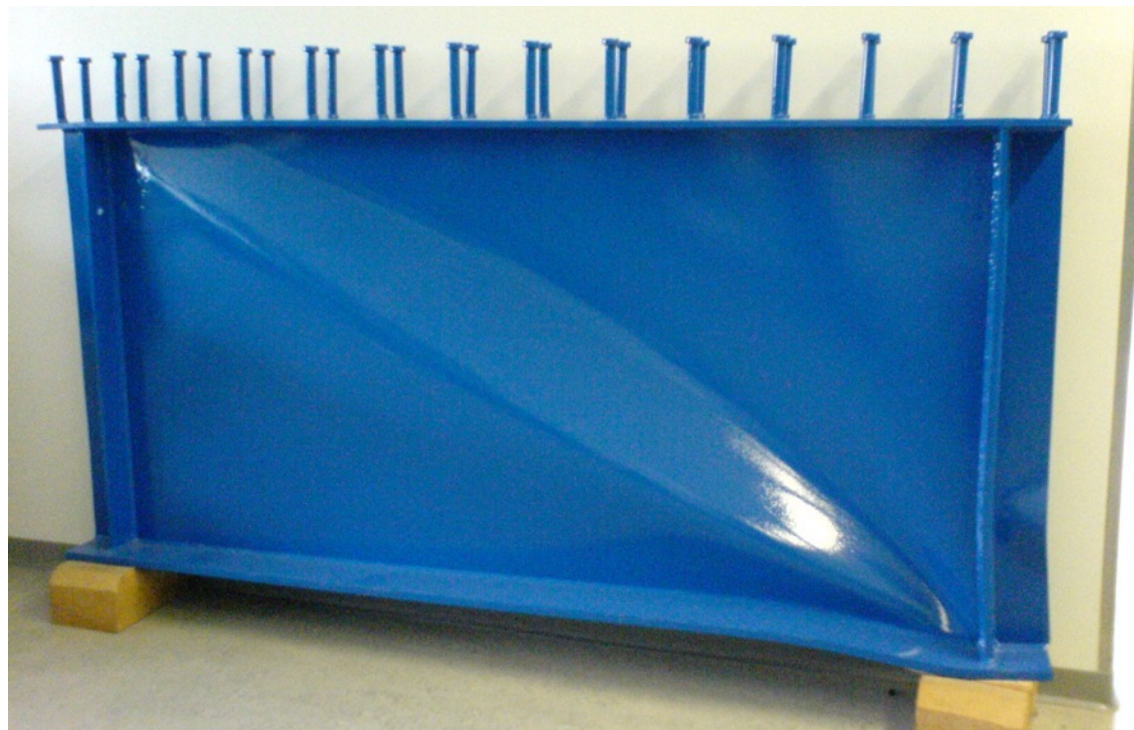
Limite classe 3: $14\varepsilon = 14 \cdot 0,814 = 11,4 \geq 8,6$ OK

Ame : $\frac{b'}{t'} = 24,5$ Pas de changement

Limite classe 1: $72\varepsilon = 72 \cdot 0,814 = 59 \geq 24,5$ OK

Profilé: classes 1 & 3 \Rightarrow **classe 3 (EE)**

En cisaillement: $33,4 \leq \sqrt{\frac{4E}{f_y}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 210000}{355}} = 49$ OK



Cisaillement, poutre testée en laboratoire



Ruine d'une poutre de pont

Annexe: exemple, indirect d'ELU effort tranchant.

Rupture du pont Grandview Triangle Bridge, Kansas City (2006)



https://www.osha.gov/doc/engineering/2006_r_08.html

On June 3, 2006, one construction employee was killed and another injured when two spans of a steel-concrete bridge (overpass) under demolition suddenly collapsed.

It appears that contractor failed to recognize the reduced load carrying capacity of the girder due to the removal of the concrete deck (cutting of reinf. steel longitudinal bars, suppressing continuity, then removal of concrete span by span). This span was the longest span ...

Rupture du pont Grandview Triangle Bridge, Kansas City (2006)

Conséquence sur le pont inférieur, sur lequel le supérieur s'est effondré:



A cause de l'importante surcharge locale, près de l'appui, pas de rupture en flexion, mais ruine par voilement en cisaillement de l'âme, avec plastification (Plate girder with shear plate buckling & yielding).

https://www.osha.gov/doc/engineering/2006_r_08.html