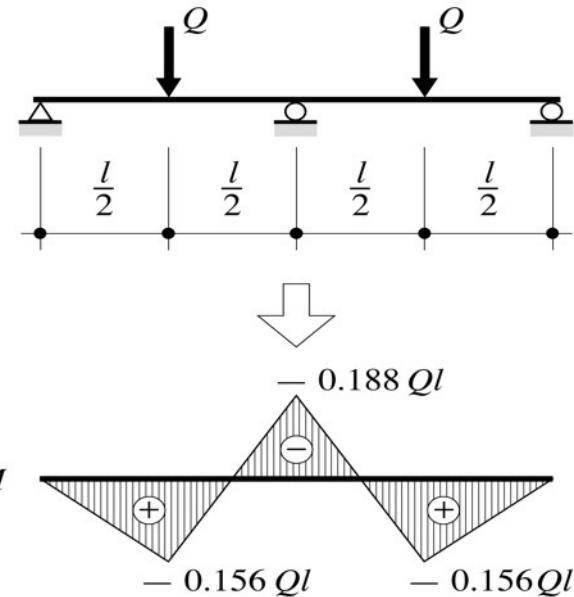


Cours structures en métal

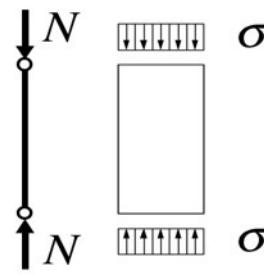
TGC 10, chapitres 2 et 5:
Classes de section

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

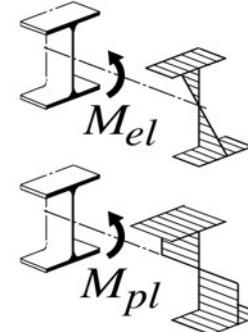
Calcul élastique des efforts intérieurs



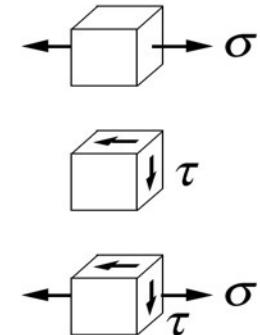
Elément



Section



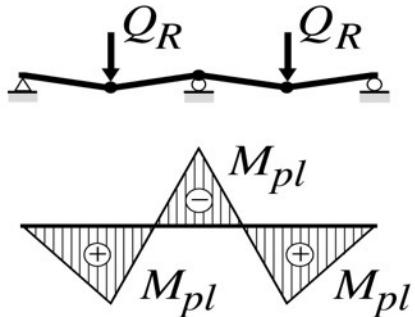
Contraintes



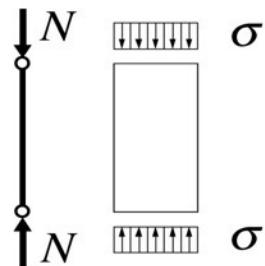
Rappel, Fig. 2.24: Niveaux de calcul de la résistance

Calcul plastique des efforts intérieurs

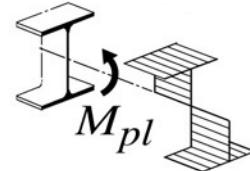
Mécanisme de ruine



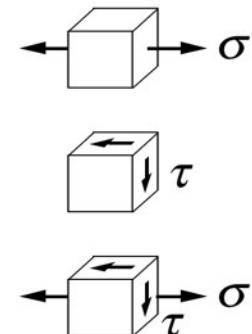
Elément



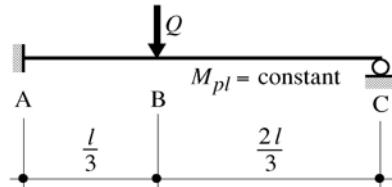
Section



Contraintes

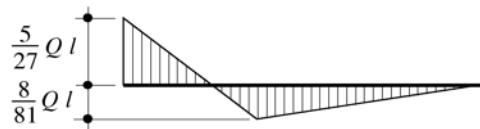


TGC 11, Fig. 11.17: analyse d'une poutre hyperstatique



Système statique de départ
Hyperstaticité : $n_0 = 1$

Détermination des rotations



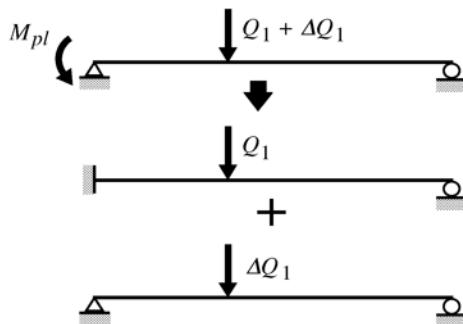
Première rotule en A quand :

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

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

Nouveau système statique

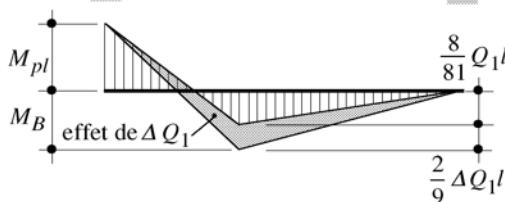
Hyperstaticité : $n_1 = n_0 - 1 = 0 \Rightarrow$ Système isostatique



Deuxième rotule en B quand :

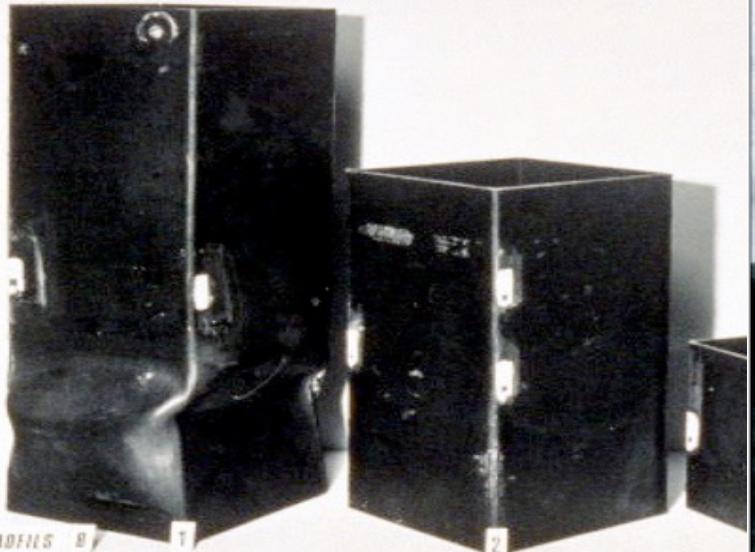
$$M_B = \frac{8}{81} Q_1 l + \frac{2}{9} \Delta Q_1 l = M_{pl} \text{ d'où : } \Delta Q_1 = 2.1 \frac{M_{pl}}{l}$$

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

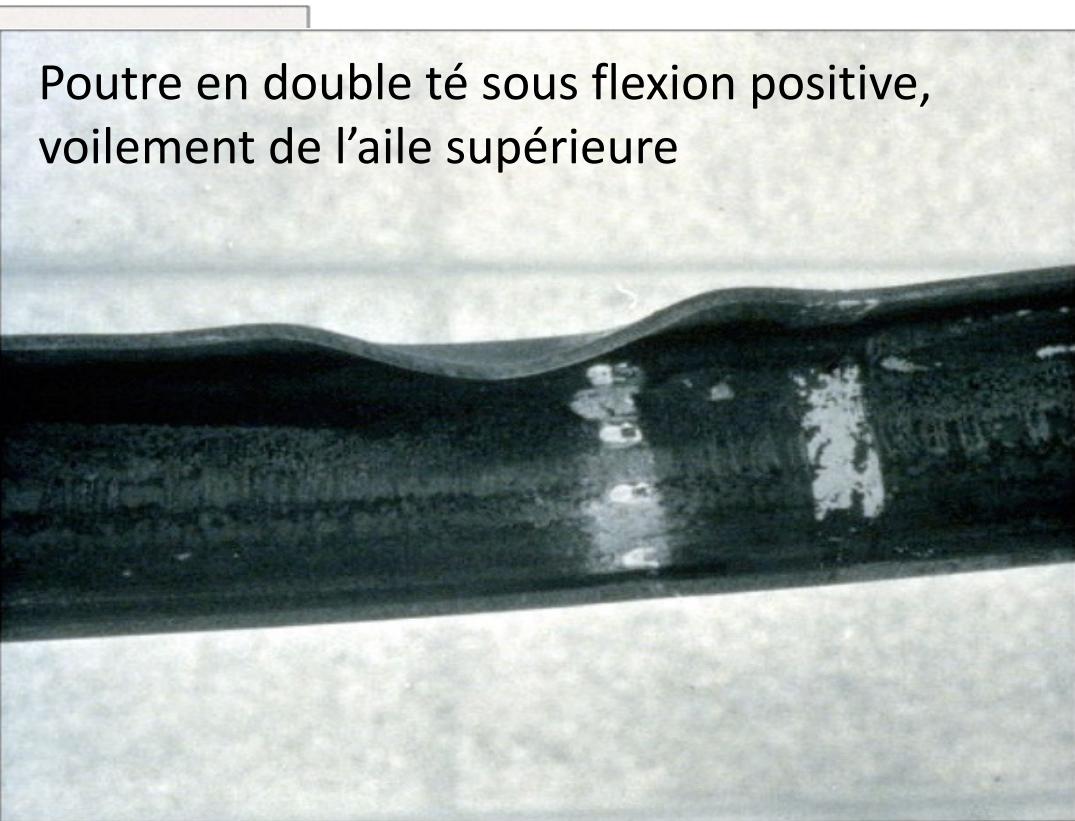


ELU: Phénomène de voilement et influence sur analyse structurale et dimensionnement

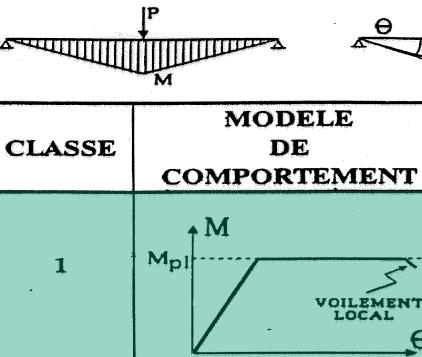
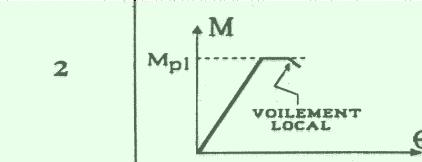
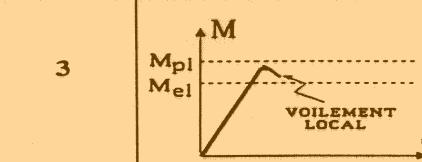
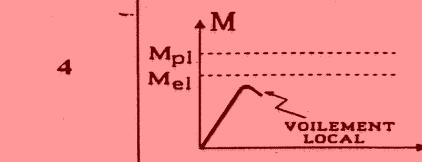
Tube carré en compression

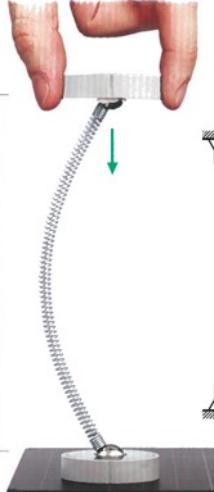


Poutre en double té sous flexion positive,
voilement de l'aile supérieure

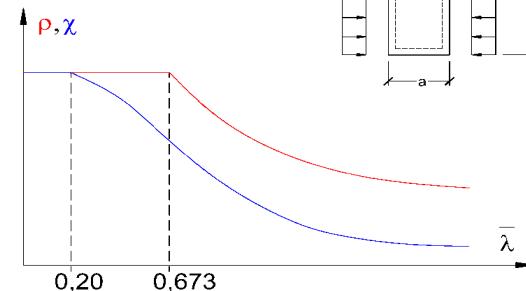


ELU: Critères de classification des sections

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

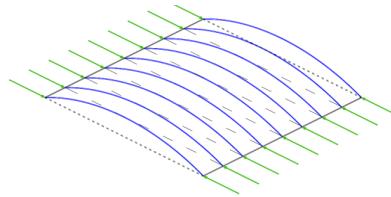


Facteur de réduction résistance

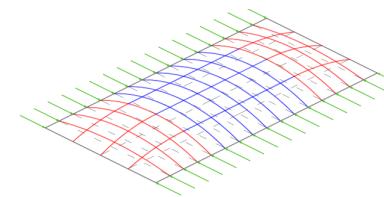


Plaques: comportements par rapport à une barre articulée

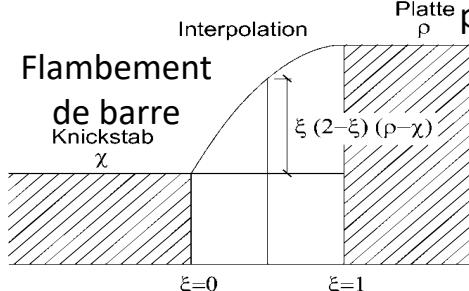
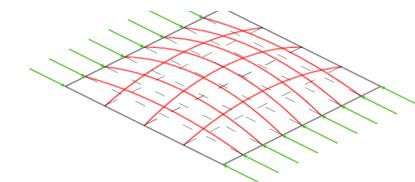
Flambement (c)



Voilement proche du flambement



Voilement (p)



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;

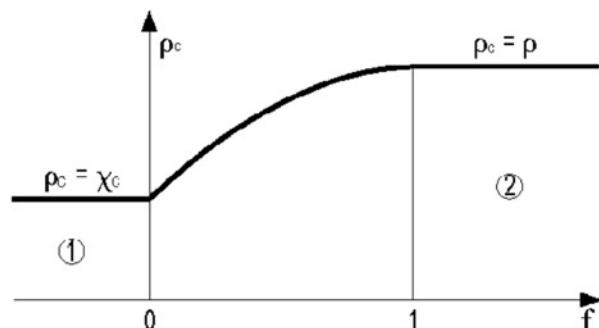
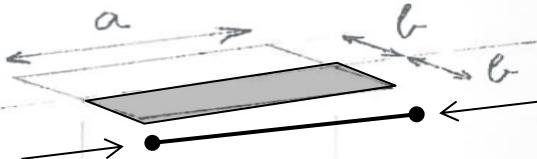
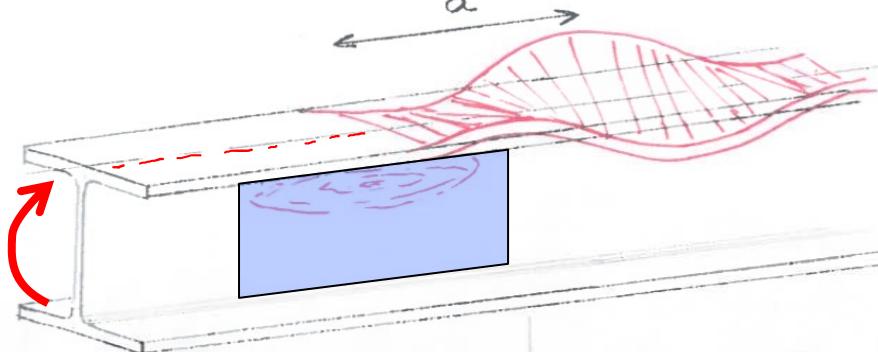


Figure 6.8 — Interpolation between plate (2) and column (1) buckling

Voilement: phénomène et décomposition d'une section en plaques

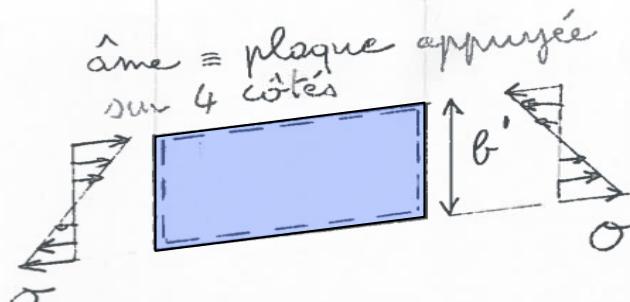


2 appuis longi. comme poteau Euler

aille = plaque appuyée sur 3 côtés



1 bande latérale d'appui



âme = plaque appuyée sur 4 côtés

2 bandes latérales d'appui

Résistance au voilement fonction de b/t (élancement d'une plaque)

Résistance au voilement influencée par :

- Conditions d'appui des bords (latéraux)
- Conditions de chargement

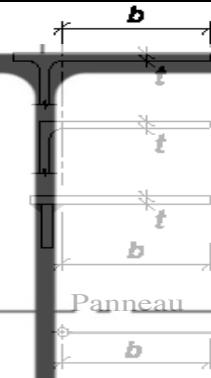
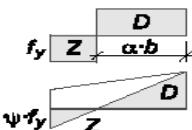
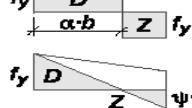
ELU: Critères d'élancement pour éviter le voilement (SIA 263)

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	
Âme du profilé					
	Compression		33ε	38ε	42ε
	Flexion Simple		72ε	83ε	124ε
	Compression avec flexion $\psi > -1$ (Compression +)		$\frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$ $\alpha \geq 0,5$	$\frac{456\varepsilon}{13\alpha - 1}$ $\alpha \geq 0,5$	$\frac{42\varepsilon}{0,67 + 0,33\psi}$
	Traction avec flexion $\psi \leq -1$ (Compression +)		$\frac{36\varepsilon}{\alpha}$ $\alpha \leq 0,5$	$\frac{41,5\varepsilon}{\alpha}$ $\alpha \leq 0,5$	$62\varepsilon(1 - \psi)\sqrt{-\psi}$
panneau					
	Flexion et/ou compression	$\frac{D}{t} \leq 50\varepsilon^2$	$\frac{D}{t} \leq 70\varepsilon^2$	$\frac{D}{t} \leq 90\varepsilon^2$	
Cas particulier Tubes					

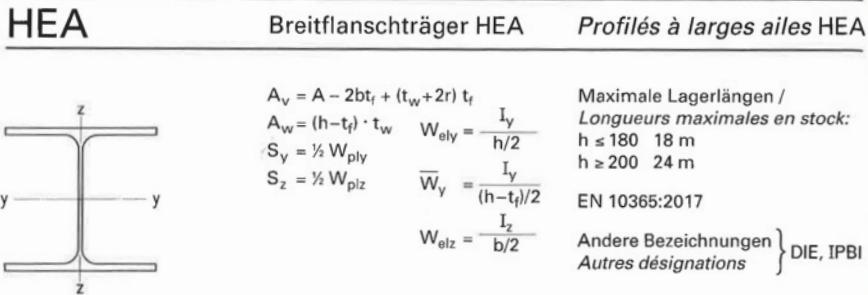
ELU: Critères d'élancement pour éviter le voilement (SIA 263)

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

Géométrie	Sollicitation	Elancement limite b/t maximal		
		Classe de section 1	Classe de section 2	Classe de section 3
Aile du profilé  Panneau	Compression	$f_y \frac{D}{b} f_y$	9ε	10ε
	Compression avec flexion, bord libre comprimé	$f_y \frac{D}{\alpha \cdot b} f_y$ 	$\frac{9\varepsilon}{\alpha}$	$\frac{10\varepsilon}{\alpha}$
	Compression avec flexion, bord libre tendu	$f_y \frac{D}{\alpha \cdot b} f_y$ 	$\frac{9\varepsilon}{\alpha^{1.5}}$	$\frac{10\varepsilon}{\alpha^{1.5}}$
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 $1 \geq \psi \geq 0$ pour $0 \geq \psi \geq -1$	(compression positive)
Facteur de réduction pour les aciers à plus haute limite d'élasticité (par rapport à S235, où $\varepsilon = 1,0$):				S275: $\varepsilon = 0,924$ S355: $\varepsilon = 0,814$ S460: $\varepsilon = 0,715$
$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$				

ELU: Contrôle critères d'élancement pour éviter le voilement

METHODE POUR PROFILES: Utilisation table Szs C5, onglet profil



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: ▲ EP ▲ FE
 S460: ○ EP ● EE ○ 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'élancement 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.

Elancement 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.

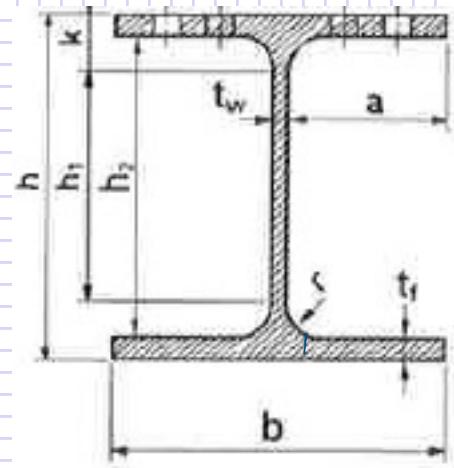
$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}}$$

IPE	m kg/m	$I_y \cdot 10^6$ mm ⁴	Hilfswerte Valeurs auxiliaires		S355		Querschnittswiderstände Résistances des sections ①		Verfahren Méthode PP EP	
					N_{Rd} kN	V_{Rd} kN	$M_{y,Rd}$ kNm	$M_{z,Rd}$ kNm	erlaubt für permise avec	
			a	ξ					n_s	n_{ls}
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

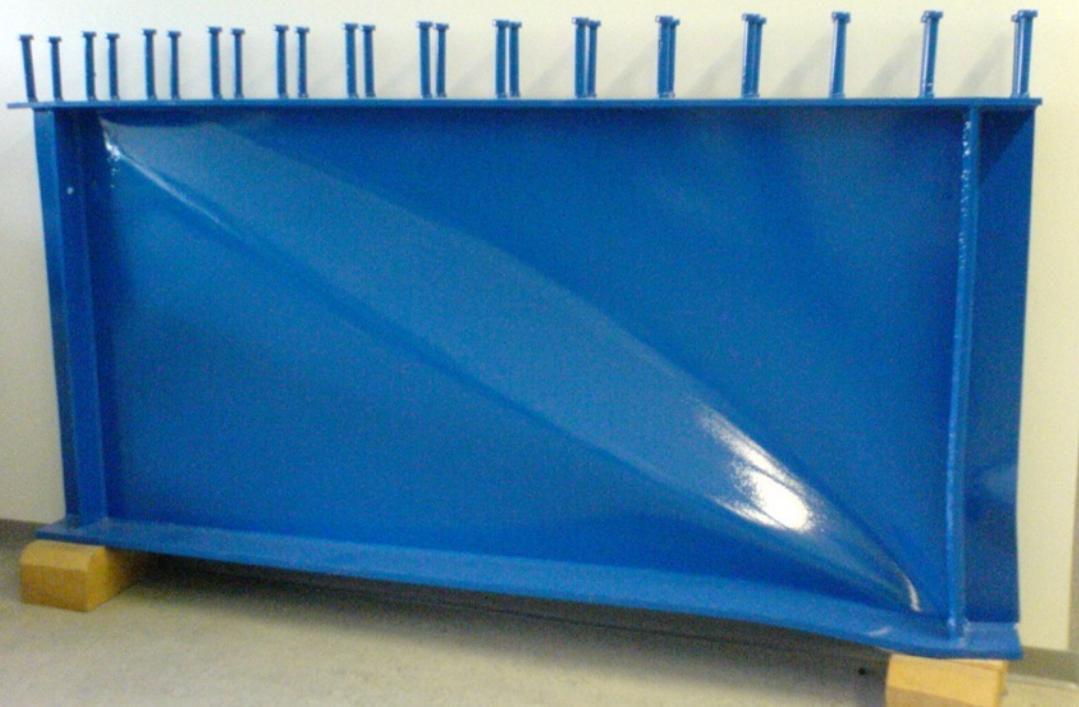
Limite classe 3: $14\varepsilon = 14 \cdot 0,814 = 11,4 \geq 8,6$ OK

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 ...

Annexe: exemple, indirect d'ELU en effort tranchant.

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