

Palplanches

Ancrage excentré des rideaux
de palplanches AZ



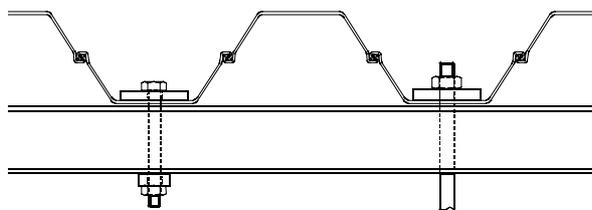
PROFILARBED S.A.
Groupe Arcelor

Introduction

Les palplanches en Z de la série AZ commercialisées par ProfilARBED se distinguent des profils en Z de la concurrence et des palplanches en U par les caractéristiques suivantes, notamment:

- combinaison du profil en Z, avantageux, et du joint Larssen, éprouvé de longue date, ce qui en fait une palplanche économique, caractérisée par un rapport module de résistance / poids supérieur
- position favorable des joints à l'«extérieur», en fibre extrême, ce qui permet de s'affranchir du problème de la transmission des efforts de cisaillement dans le joint et fait qu'un pinçage n'est pas indispensable pour garantir une résistance maximale.

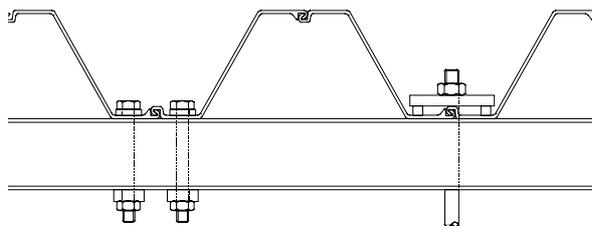
Or, dans la pratique, lorsque le rideau de palplanches doit être ancré en tête, il n'est pas rare que l'on donne la préférence aux palplanches en U. Ceci s'explique par des raisons constructives: les palplanches en U permettent de centrer les boulons de fixation des liernes et les tirants dans le dos de la palplanche.



Ancrage des palplanches en U

Dans le cas des palplanches en Z, la présence de la serrure dans l'axe du creux de l'onde conduit à adopter une solution conservatrice et à fixer les liernes au moyen de deux boulons, ce qui a pour effet à la fois d'augmenter le coût des matériaux et de compliquer – et de renchérir – l'installation.

Si l'on veut que les tirants soient centrés, ils doivent traverser la serrure. Ceci nécessite l'emploi d'une plaque d'appui avec cales soudées formant chevalet. Si la nappe phréatique est présente à l'arrière du rideau, la traversée de la serrure peut alors conduire à des problèmes d'étanchéité.



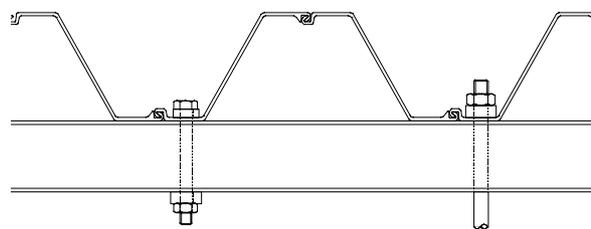
Ancrage traditionnel des palplanches en Z

Une solution économique pour l'ancrage des palplanches AZ

Afin de tirer pleinement parti des avantages des palplanches AZ tout en offrant une solution globalement économique, ProfilARBED a mis au point une solution alternative, financièrement intéressante:

l'ancrage excentré.

Le principe de cette solution, qui combine les propriétés statiques remarquables des palplanches AZ avec la simplicité constructive des ancrages utilisés pour les palplanches en U, consiste à faire passer les boulons ou les tirants tout simplement à côté de la serrure, au centre de la demi-aile: on s'affranchit ainsi à la fois de la traversée, problématique, de la serrure et de l'utilisation d'une plaque d'appui complexe.



Une solution économique pour l'ancrage des palplanches AZ

L'intérêt de l'excentrement réside dans le fait de pouvoir tirer profit de la résistance élevée des palplanches en Z, en supprimant le perçage dans la serrure.

Les avantages économiques sont évidents:

- la fixation excentrée des liernes, au moyen d'un boulon unique, réduit le coût des matériaux et de l'installation,
- l'excentrement des tirants permet l'utilisation de plaques d'appui simples, tandis que la traversée de l'aile, et non plus de la serrure, permet d'assurer l'étanchéité sans problèmes particuliers.

Les études

Jusqu'à maintenant, le cas de l'ancrage excentré des palplanches AZ n'a été traité dans aucun règlement. ProfilARBED (Arcelor), en étroite collaboration avec l'Institut de construction métallique de la RWTH (Aix-la-Chapelle), a donc choisi de mener un vaste projet de recherche visant à analyser le comportement des palplanches en cas d'ancrage excentré d'une part et à établir des règles de dimensionnement correspondantes d'autre part.

Plus précisément, le projet s'est déroulé de la manière suivante:

- études expérimentales sur des palplanches en Z soumises à des efforts excentrés
- élaboration d'un modèle aux éléments finis, calibré par rapport aux essais
- analyse du comportement d'une paire de palplanches soumise à des efforts excentrés à l'intérieur d'un rideau
- élaboration d'une méthode de dimensionnement.

Les résultats de l'étude, qui ont fait par ailleurs l'objet d'un rapport final détaillé [1], sont résumés ici dans une perspective pragmatique.



Etudes expérimentales

Les essais sur les palplanches en Z ont été effectués à l'Institut de sidérurgie de la RWTH.



Palplanche double AZ18 dans le banc d'essai



Palplanche double AZ18 après l'essai

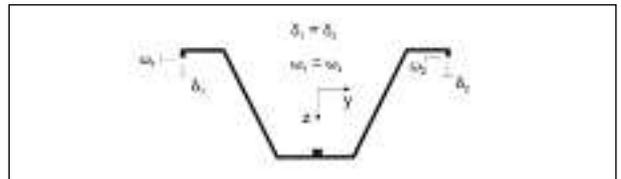
Pour les essais, l'effort d'ancrage a été appliqué, au moyen d'un vérin, à une plaque d'appui excentrée. Pour des raisons techniques liées à l'essai, celui-ci ne portait que sur une palplanche double. Pour assurer la continuité, les deux palplanches étaient entretoisées au moyen d'étrésillons.

Les photos des palplanches AZ18 après l'essai témoignent du comportement ductile obtenu avec cette solution.

Calibration d'un modèle aux éléments finis et simulations

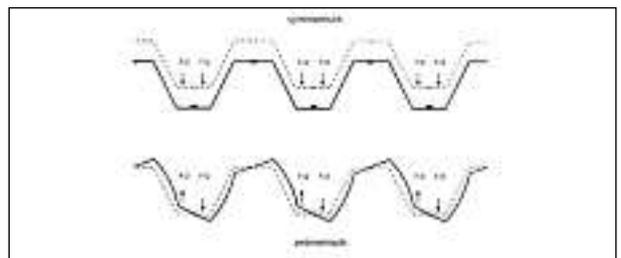
A partir des résultats d'essai, on a procédé à la calibration d'un modèle aux éléments finis, modèle que l'on a ensuite utilisé pour procéder à des études paramétriques. Ces simulations aux éléments finis ont été réalisées à l'Institut de construction métallique de la RWTH.

Les conditions aux limites correspondant au rideau continu, qui n'avaient pu être prises en compte que de manière partielle lors des essais, ont pu alors être prises en considération de manière plus précise.



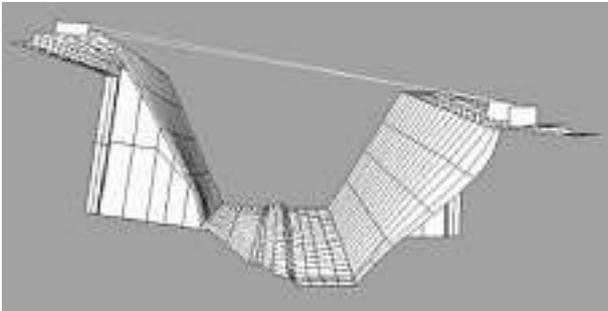
Conditions aux limites d'une palplanche double AZ

Dans le principe, l'effort excentré localisé peut être décomposé au moyen d'un modèle simple en une composante symétrique et une composante antisymétrique.

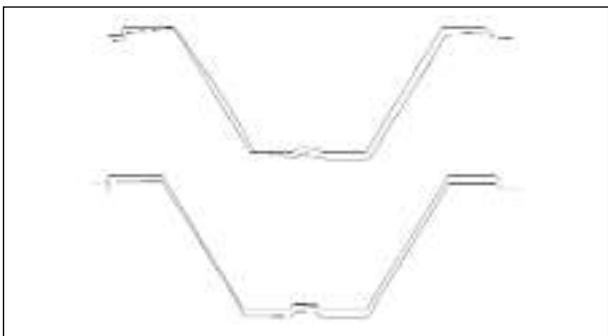


Composantes symétriques et antisymétriques de l'effort

L'allure des déformations observées lors des essais est confirmée qualitativement par les études aux éléments finis.



Déformation sous l'effet d'un effort excentré



Déformation pour différents paramètres

L'importance de la rotation est influencée par différents paramètres tels que la portée et la raideur du sol à l'arrière du rideau.

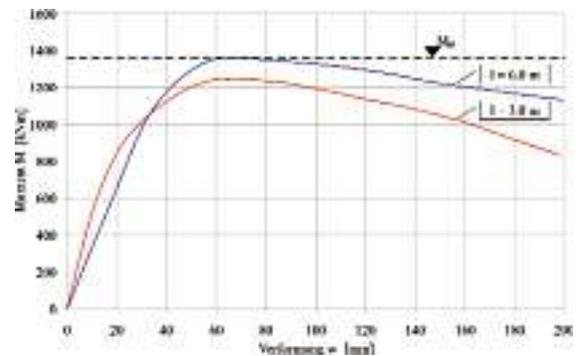


Rotation due à la composante antisymétrique de l'effort (fortement exagérée)

Les études paramétriques ont permis d'étudier divers états limites potentiels dans le cas d'une application excentrée des efforts, et ce, pour les conditions aux limites réelles:

1. moment résistant de la section au niveau du point d'application, excentré, de l'effort
2. résistance à l'ouverture de la serrure sous l'effet de la traction (dégrafage)
3. résistance au cisaillement de l'aile (poinçonnement) et résistance à la traction de l'âme de la palplanche soumise à l'effort d'ancrage localisé.

On a ainsi étudié le comportement de la section conduisant à un moment résistant réduit pour différents facteurs d'excentricité α_{ex} imposés par les conditions aux limites.



Etude du moment résistant

On a également procédé à d'autres essais mécaniques ainsi qu'à des simulations aux éléments finis du comportement de la serrure sous l'action d'efforts de traction horizontaux.



Etude de la résistance au dégrafage

Elaboration d'une méthode de dimensionnement

L'analyse des résultats d'essai et des études paramétriques par éléments finis a permis d'élaborer une méthode de dimensionnement tenant compte des conditions aux limites et des actions indirectes auxquelles est soumise une palplanche double Z sous l'effet d'efforts localisés excentrés. Cette méthode est conforme à l'EN 1993-5 et couvre à la fois les vérifications locales et l'effet sur la résistance globale.

Les vérifications proposées dans la méthode ci-après pour la plaque d'appui font appel, en plus des essais décrits précédemment, à une autre étude portant sur la détermination des dimensions des plaques d'appui [2], également réalisée par l'Institut de construction métallique de la RWTH.

Méthode de dimensionnement et valeurs numériques pour le calcul

Remarque: L'ancrage excentré est également utilisable dans le cas de tirants inclinés; les règles de dimensionnement indiquées ici concernent toutefois uniquement la **composante horizontale** de l'effort d'ancrage.

Déroulement de la procédure

- Détermination des dimensions des plaques d'appui et vérification des plaques
- Détermination des facteurs d'excentricité pour chaque point d'ancrage et vérification de la résistance sous l'effet de l'effort localisé
- Détermination des coefficients de réduction pour chaque point d'ancrage et vérification du rideau au niveau de l'ancrage et en section courante

Choix des dimensions des plaques d'appui

Les dimensions de la plaque d'appui doivent être choisies dans les limites indiquées ci-après:

Largeur: $0.90 \cdot b_c \leq b_a \leq b_c$

Longueur: $h_a \leq 2.5 \cdot b_a$

Epaisseur: $t_a = \begin{cases} \geq 40\text{mm} \\ \geq 2 \cdot t_f \\ \geq d_A / 3 \end{cases}$

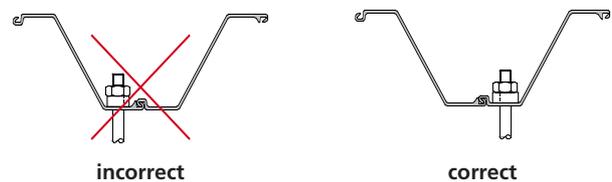
avec: b_c = largeur de l'aile de la palplanche AZ (entre congés) (cf. Tab. 3)
 t_f = épaisseur de l'aile
 d_A = diamètre nominal du boulon ou du tirant

Tab. 1: Diamètres des trous des plaques d'appui (valeurs indicatives)

Diamètre nominal d_A	ϕ mm	d_{sw} mm	d' mm
1.5"	41	60	51
1.75"	48	70	59
2"	54	80	67
2.25"	60	85	73
2.5"	68	95	81
2.75"	74	105	89
3"	81	110	96
3.25"	88	120	104
3.5"	94	130	112

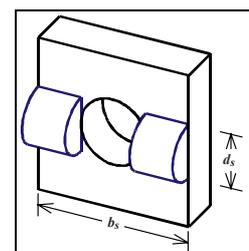
(Dimensions selon [3])

Important: Dans tous les cas, l'ancrage doit se faire sur l'aile comportant la serrure mâle (recourbée).



correct

Disposition correcte de la plaque d'appui



Rondelle à bossages selon [3]

Vérification des plaques d'appui

Nota: Les expressions ci-après sont extraites du rapport [2]

Remarques: Les règles de dimensionnement indiquées ici s'appliquent également dans le cas de tirants inclinés; elles ne concernent toutefois que la **composante horizontale** de l'effort d'ancrage.

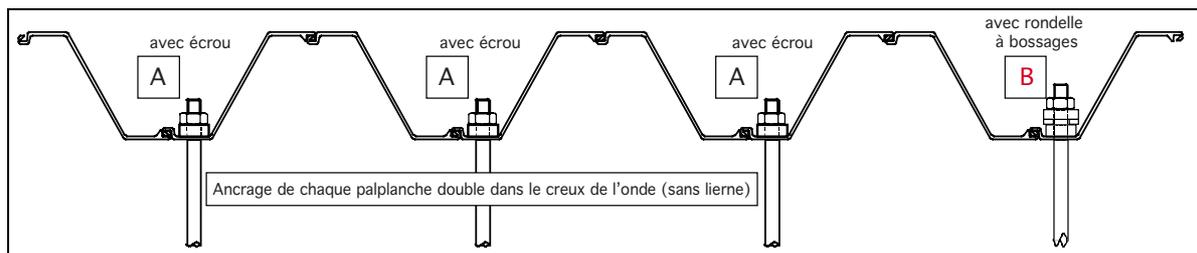
Dans le cas de tirants inclinés, prévoir des dispositions constructives appropriées pour l'introduction de la composante verticale dans le rideau, et procéder aux vérifications complémentaires nécessaires.

Dans le cas où, pour des angles d'inclinaison importants, il est nécessaire de prévoir des chaises d'appui, leur utilisation doit être étudiée au cas par cas.

Les plaques d'appui doivent être vérifiées à la flexion. Selon le cas, on distinguera les situations suivantes:

- ancrage sans lierne → **A** (le cas échéant avec rondelle à bossages → **B**)
- fixation des liernes au moyen de boulons → **A**
- ancrage de plusieurs palplanches doubles → **C** (le cas échéant avec rondelle à bossages → **D**)

En l'absence de lierne, l'ancrage doit être effectué dans chaque creux d'onde.



Ancrage sans lierne

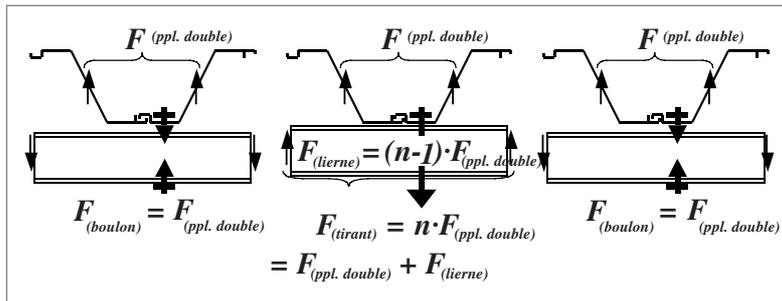
Vérification de la plaque d'appui cas **A** et **B**: absence de lierne, ou fixation de la lierne au moyen de boulons

$$F_{Ed} \leq F_{Rd,pl} = \frac{4}{3}(b_a - \phi) \cdot X \cdot \left[\sqrt{1 + 3 \left(\frac{t_a}{X} \right)^2} - 1 \right] \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

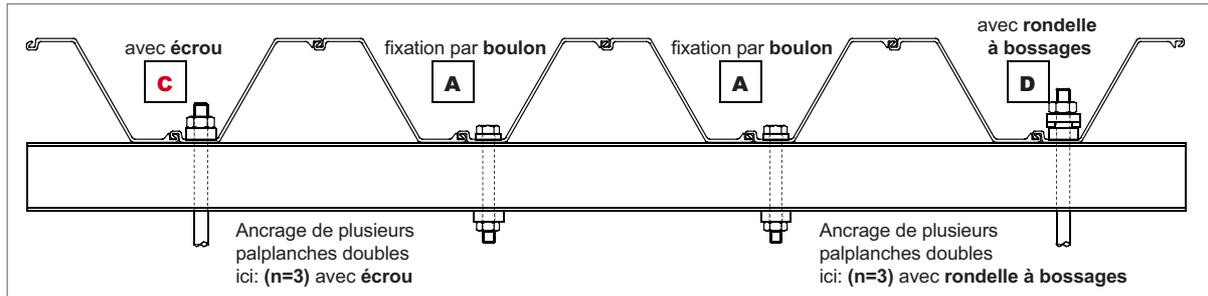
A avec écrou: $X = h_a - d'$

B avec rondelle à bossages: $X = h_a$

Si un tirant doit ancrer plusieurs palplanches doubles, la plaque d'appui du tirant, excentrée, doit faire l'objet d'une vérification du **type C ou D**. Les plaques d'appui des boulons servant à la fixation des liernes doivent faire l'objet d'une vérification du type **A**.



Efforts dans les boulons et efforts d'ancrage à considérer



Ancrage avec lierne

Vérification de la plaque d'appui cas **C** et **D**: ancrage de plusieurs palplanches doubles ($n > 1$)

$$F_{Ed} \leq F_{Rd,pl} = \frac{4}{3} (b_a - \phi) \cdot \frac{n}{2n-1} \cdot X \cdot \left[\sqrt{1 + 3 \left(\frac{t_a}{X} \right)^2} - 1 \right] \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

C avec écrou:
$$X = \frac{h_a - d' + 2(n-1)(s-d')}{2n-1}$$

D avec rondelle à bossages:
$$X = \frac{h_a + 2(n-1)s}{2n-1}$$

avec: **A** et **B**: F_{Ed} = composante horizontale de l'effort d'ancrage rapporté à la palplanche double

pour **C** et **D**: F_{Ed} = composante horizontale de l'effort d'ancrage par tirant

b_a, h_a, t_a = largeur / longueur / épaisseur de la plaque d'appui

f_y = limite d'élasticité de la plaque d'appui

$d' = (d_{sw} + \phi) / 2$ = diamètre de chargement

d_{sw} = dimension entre plats de l'écrou

ϕ = diamètre du trou dans la plaque

n = nombre de palplanches doubles à ancrer

s = écartement des U de la lierne

Vérification complémentaire:

pour **A** et **C** (avec écrou):
$$F_{Ed} \leq \frac{\pi}{2\sqrt{2}} (d_{sw}^2 - \phi^2) \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

pour **B** et **D** (avec rondelle à bossages):
$$F_{Ed} \leq d_s (b_s - \phi) \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

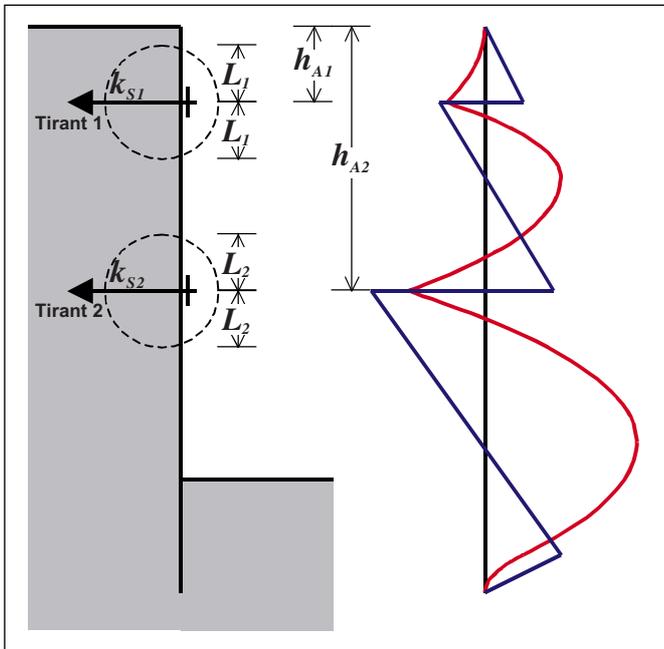
avec: d_s = diamètre des bossages en demi-cylindre (= 50 mm [3])

$b_s = \min \{b_s; b_a\}$

b_s = largeur de la rondelle à bossages

Facteur d'excentricité $\alpha_{ex,i}$ au point d'ancrage «i»

- Remarques:**
- En cas de plusieurs niveaux d'ancrage, α_{ex} doit être déterminé séparément pour chaque niveau.
 - La distance entre le niveau d'ancrage supérieur et la tête des palplanches doit être au minimum de 1,0 m.



Facteur d'excentricité:

$$\alpha_{ex,i} = \frac{1}{1 + \frac{C_{Sym,i}}{C_{Ant}}}$$

avec:

$$C_{Sym,i} = k_{s,i} \cdot L_i \cdot \left(0.50 + 1.50 \frac{h_{A,i}}{L_i} \right)$$

pour: $\frac{h_{A,i}}{L_i} < 1.00$

avec: $L_i = \sqrt[4]{4 \frac{EI}{k_{s,i}}}$

$$C_{Sym,i} = k_{s,i} \cdot L_i \cdot 2$$

pour: $\frac{h_{A,i}}{L_i} \geq 1.00$

Niveaux des tirants à prendre en considération

- avec:
- $\alpha_{ex,i}$ = facteur d'excentricité (sans dimension)
 - $C_{Sym,i}$ = raideur du système [MN/m²]
 - L_i = longueur élastique du tirant [m]
 - $h_{A,i}$ = niveau d'ancrage à partir de la tête de palplanche [m]
 - C_{Ant} = rigidité de torsion de la palplanche [MN/m²] (**selon Tab. 3**)
 - EI = rigidité de flexion du rideau [MNm²/m] (**selon Tab. 3**)
 - $k_{s,i}$ = module de réaction du sol au point d'ancrage considéré (moyenné sur la longueur $2L_i$) [MN/m³]
(cf. valeurs indicatives du Tab. 2)

Tab. 2: Valeurs indicatives du module de réaction k_s

Type de sol	k_s MN/m ³
Tourbe	2
Argile, argile limoneuse, argile limono-sableuse	5
Limon	10
Sable lâche, moyennement compact, compact	40, 80, 150
Graviers	100

- Remarque:**
- Dans le cas de terrains stratifiés, il convient de déterminer une valeur moyenne de k_s au niveau de l'ancrage.

Tab. 3: Palplanches AZ avec ancrage excentré: valeurs de calcul

Ppl.	Largeur aile b_c mm	Largeur plaque b_a mm	EI MNm ² /m	C_{Ant} MN/m ²	Largeur ppl. double B m	Epaiss. aile t_f mm	Epaiss. aile t_w mm	t_{wp} cm/m	Caractér. de la serrure K_L mm	C_{Ek} mm	W_{pl} cm ³ /m	W_{el} cm ³ /m	A_v cm ² /m	α [°]	L_{Ek} m	Classification selon EN 1993-5				
																5 235	5 270	5 320	5 355	5 390
AZ 12			38.1	31.0		8.5	8.5	1.269		1.90	1409	1200	36.2			2	3	3	3	3
AZ 13	154	145-150	41.4	39.5	1.34	9.5	9.5	1.418	1.38	2.38	1528	1300	40.3	45.4	5.5	2	2	2	3	3
AZ 14			44.7	50.9		10.5	10.5	1.567		2.90	1651	1400	44.4			2	2	2	2	3
AZ 17			66.3	38.3		8.5	8.5	1.349		2.68	1944	1665	48.8			2	2	3	3	3
AZ 18	147	135-145	71.8	48.3	1.26	9.5	9.5	1.508	1.85	3.34	2104	1800	54.4	55.4	7.0	2	2	2	3	3
AZ 19			77.7	62.8		10.5	10.5	1.667		4.08	2275	1940	60.0			2	2	2	2	2
AZ 25			109.7	82.6		12	11.2	1.778		4.58	2873	2455	71.5			2	2	2	2	2
AZ 26	132	120-130	116.6	106.5	1.26	13	12.2	1.937	2.17	5.38	3059	2600	77.7	58.5	6.0	2	2	2	2	2
AZ 28			123.8	120.6		14	13.2	2.095		6.24	3252	2755	83.8			2	2	2	2	2
AZ 34			165.3	130.5		17	13	2.063		8.57	3980	3430	87.7			2	2	2	2	2
AZ 36	143	130-140	173.9	153.1	1.26	18	14	2.222	2.37	9.60	4196	3600	94.2	63.4	6.0	2	2	2	2	2
AZ 38			182.9	181.0		19	15	2.381		10.70	4417	3780	100.7			2	2	2	2	2
AZ 36 n			188.5	62.9		17	11.2	1.600		7.22	4098	3597	74.4			2	2	2	2	2
AZ 38 n	168	155-165	199.2	76.7	1.40	18	12.2	1.743	2.34	8.10	4353	3793	80.9	63.2	6.5	2	2	2	2	2
AZ 40 n			209.9	91.4		19	13.2	1.886		9.02	4614	3989	87.3			2	2	2	2	2
AZ 46			231.9	221.4		18	14	2.414		10.39	5295	4595	107.4			2	2	2	2	2
AZ 48	147	135-145	242.9	248.6	1.16	19	15	2.586	2.76	11.58	5553	4800	114.8	71.5	6.0	2	2	2	2	2
AZ 50			254.2	285.2		20	16	2.759		12.83	5816	5015	122.2			2	2	2	2	2

Vérification de la résistance du rideau de palplanches AZ sous l'effet de l'effort localisé

On doit procéder à la vérification de la résistance déterminante du rideau de palplanches sous l'effet de l'effort localisé (à chaque point d'ancrage excentré)

$$F_{Ed,i} \leq R_{Rd,Ex,AZ} = \frac{\min(R_{Lock,Rk}; R_{Vf,Rk}; R_{tw,Rk})}{\gamma_{M0}}$$

Avec:

$F_{Ed,i} = F'_{Ed} \cdot B$ = effort d'ancrage appliqué, rapporté à la palplanche double

F'_{Ed} = effort d'ancrage appliqué (composante horizontale) (par mètre linéaire)

B = largeur de la palplanche double (selon Tab. 3)

K_L = caractéristique de la serrure (selon Tab. 3)

t_r, t_w = épaisseur de l'aile/épaisseur de l'âme (selon Tab. 3)

b_a, h_a = largeur/longueur de la plaque d'appui

f_y, f_u = limite d'élasticité/résistance à la traction des palplanches AZ (selon Tab. 4)

$\alpha_{ex,i}$ = facteur d'excentricité au point d'ancrage considéré

$$R_{Vf,Rk} = (h_a + b_a) \cdot t_F \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}} \cdot (1 + \alpha_{ex,i})$$

poinçonnement de l'aile

$$R_{tw,Rk} = h_a \cdot t_w \cdot f_y \cdot (1 + \alpha_{ex,i})$$

traction dans l'âme

$$R_{Lock,Rk} = (h_a + 2b_a) \cdot K_L \cdot f_u \cdot \frac{1}{1 - \alpha_{ex,i}}$$

traction dans la serrure

Attention: Pour la résistance au dégrafage (traction dans la serrure), prendre f_u (résistance à la traction)

Tab. 4: Nuances d'acier des palplanches AZ

Nuance (selon EN 10248)	Limite d'élasticité f_y [N/mm ²]	Résistance à la traction f_u [N/mm ²]
S 240 GP	240	340
S 270 GP	270	410
S 320 GP	320	440
S 355 GP	355	480
S 390 GP	390	490
S 430 GP	430	510

Attention: Pour F_{Ed} , prendre la composante horizontale de l'effort d'ancrage à reprendre dans la palplanche double (cf. schéma page 7).

Remarque: Les expressions ci-dessus, et notamment K_L , résultent des équations (5.23), (5.24) et (5.25) données dans le document [1].

Coefficients de réduction $\beta_{ex,i}$ au point d'ancrage «i»

Au point d'ancrage «i» étudié:

$$\beta_{ex,i} = \sqrt{1 - (1 - \alpha_{ex,i}) \frac{F_{Ed,i}}{C_{Ex} \cdot f_y}}$$

avec: $\beta_{ex,i}$ = coefficient de réduction au point d'ancrage «i»

$\alpha_{ex,i}$ = facteur d'excentricité au point d'ancrage

$F_{Ed,i}$ = composante horizontale de l'effort d'ancrage appliqué (par mètre linéaire de rideau)

f_y = limite d'élasticité de la palplanche AZ (selon Tab. 4)

C_{Ex} = caractéristique de la palplanche pour la flexion transversale (selon Tab. 3)

Dans le cas de plusieurs niveaux d'ancrage $\beta_{ex,i}$ doit être déterminé séparément pour chaque niveau.

Remarque: Dans le cas de rideaux de soutènement combinant ancrages excentrés et ancrages centrés ou butons, on prendra $\beta_{ex} = 1.0$ aux points d'ancrage centré ou de butonnage.

Vérification de la résistance au cisaillement/à la flexion du rideau de palplanches au point d'ancrage

(Classes 1 et 2):
$$M_{Ed} \leq M_{c,Rd} = \beta_{ex,i} \cdot W_{pl,Net} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$W_{pl,Net} = W_{pl,Brut} \cdot r_{W,pl}$$

$$r_{W,pl} = 1.0 - 0.8 \cdot \phi$$

(Classe 3):
$$M_{Ed} \leq M_{c,Rd} = \beta_{ex,i} \cdot W_{el,Net} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$W_{el,Net} = W_{el,Brut} \cdot r_{W,el}$$

$$r_{W,el} = 1.0 - 1.3 \cdot \phi$$

et:
$$V_{Ed} \leq V_{Rd} = \beta_{ex,i} \cdot \frac{A_v}{\sqrt{3}} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

ainsi que, pour: $\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} > 0.50$: interaction M-V-Int.:
$$M_{Ed} \leq M_{V,Rd} = \beta_{ex,i} \cdot \left(W_{pl,Net} - \frac{\rho \cdot A_v^2}{4t_w \sin \alpha} \right) \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$\text{avec: } \rho = \left(2 \frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} - 1 \right)^2$$

- avec:
- M_{Ed} = moment de flexion dans la section considérée [kNm/m]
 - V_{Ed} = effort tranchant dans la section considérée [kN/m]
 - W_{el}, W_{pl} = module de flexion élastique/module de flexion plastique de la palplanche AZ [cm³/m] **(selon Tab. 3)**
 - A_v = aire de cisaillement de la palplanche AZ [cm²/m] **(selon Tab. 3)**
 - α = inclinaison de l'âme de la palplanche AZ [°] **(selon Tab. 3)**
 - f_y = limite d'élasticité de la palplanche AZ **(selon Tab. 4)**
 - r_w = coefficient de réduction (sans dimension) pour la prise en compte de l'affaiblissement de la section, au point d'ancrage
 - ϕ = diamètre du trou dans la palplanche AZ [m]
 - $\beta_{ex, A, i}$ = coefficient de réduction pour la prise en compte de l'excentrement, au point d'ancrage
 - t_w = $2 \cdot t_w / B$ [cm/m]

Vérifications du rideau de palplanches en section courante

De manière simplifiée, en prenant: $\beta_{ex,F} = \min \beta_{ex,i}$

(Classes 1 et 2):
$$M_{Sd} \leq M_{c,Rd} = \beta_{ex,F} \cdot W_{pl} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

(Classe 3):
$$M_{Sd} \leq M_{c,Rd} = \beta_{ex,F} \cdot W_{el} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

et:
$$V_{Sd} \leq V_{Rd} = \beta_{ex,F} \cdot \frac{A_V}{\sqrt{3}} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

Dans la mesure où il n'y a pas d'autre affaiblissement de la section, on peut introduire ici les valeurs brutes des modules de flexion.

Pour la vérification en section courante (au-dessus/au-dessous/entre les ancrages), on peut, pour simplifier, et tout en restant du côté de la sécurité, admettre pour $\beta_{ex,F}$ la plus petite des valeurs de $\beta_{ex,i}$ aux points d'ancrage voisins. Des valeurs plus favorables peuvent être déterminées comme indiqué ci-après.

Détermination plus précise de $\beta_{ex,F}$ en section courante

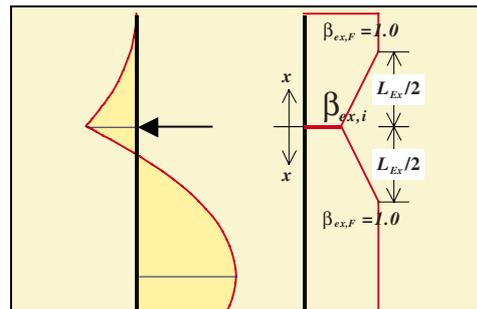
En section courante, on peut déterminer des valeurs plus favorables du coefficient de réduction $\beta_{ex,F}$ en tenant compte de la distance entre le point d'ancrage et la section considérée et, le cas échéant, de la distance L_A entre deux niveaux d'ancrage voisins et enfin, de la section de moment fléchissant maximal:

a) Rideaux à un seul niveau d'ancrage, ou bien au-dessus du niveau d'ancrage supérieur/au-dessous du niveau d'ancrage inférieur

moment maxi pour: $x \geq \frac{L_{Ex}}{2} : \beta_{ex,F} = 1,0$

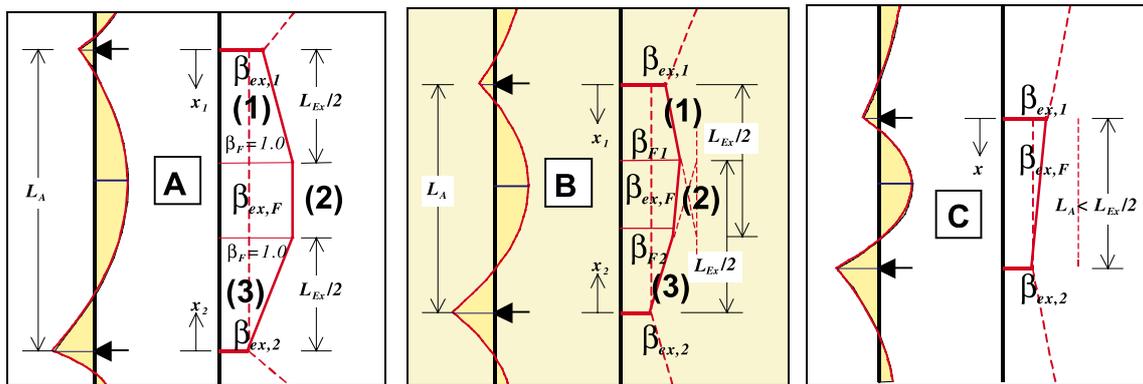
moment maxi pour: $x < \frac{L_{Ex}}{2} : \text{interpolation entre } \beta_{ex,i} \text{ et } \beta_{ex,F} = 1,0$

avec: x = distance entre le point d'ancrage et la section de moment maximum - section courante
 L_{Ex} = longueur de référence de la palplanche (selon Tab. 3)



Zone de réduction du moment résistant

b) Rideaux à plusieurs niveaux d'ancrage, entre 2 niveaux d'ancrage voisins A1 et A2



Zone de réduction du moment résistant dans le cas de plusieurs niveaux d'ancrage (avec excentrement)

avec: L_A = distance entre les deux niveaux d'ancrage voisins

A) Cas extrême (distance importante): $L_A \geq L_{Ex}$

moment maxi pour (1) $x_1 \leq L_{Ex}/2$: interpolation linéaire entre $\beta_{ex,1}$ et $\beta_{ex,F} = 1,0$

moment maxi dans zone (2): $\beta_{ex,F} = 1,0$

moment maxi pour (3) $x_2 \leq L_{Ex}/2$: interpolation linéaire entre $\beta_{ex,2}$ et $\beta_{ex,F} = 1,0$

B) Cas normal: $L_{Ex} \geq L_A \geq L_{Ex} / 2$

moment maxi pour (1) $x_1 \leq L_A - L_{Ex} / 2$: interpolation linéaire entre

$$\beta_{ex,1} \text{ et } \beta_{F,1} = \beta_{ex,1} + (1 - \beta_{ex,1}) \cdot \left(\frac{2 \cdot L_A}{L_{Ex}} - 1 \right)$$

moment maxi dans zone (2): interpolation linéaire entre $\beta_{f,1}$ et $\beta_{f,2}$

moment maxi pour (3) $x_2 \leq L_A - L_{Ex} / 2$: interpolation linéaire entre

$$\beta_{ex,2} \text{ et } \beta_{F,2} = \beta_{ex,2} + (1 - \beta_{ex,2}) \cdot \left(\frac{2 \cdot L_A}{L_{Ex}} - 1 \right)$$

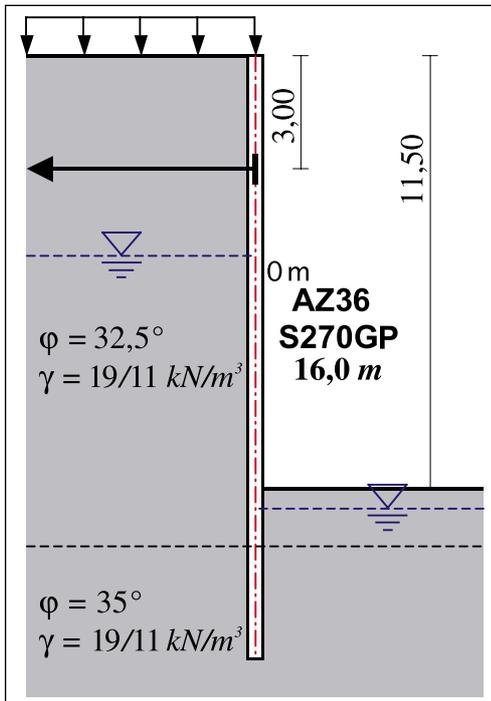
C) Cas extrême (distance faible)

Dans toute la section courante:

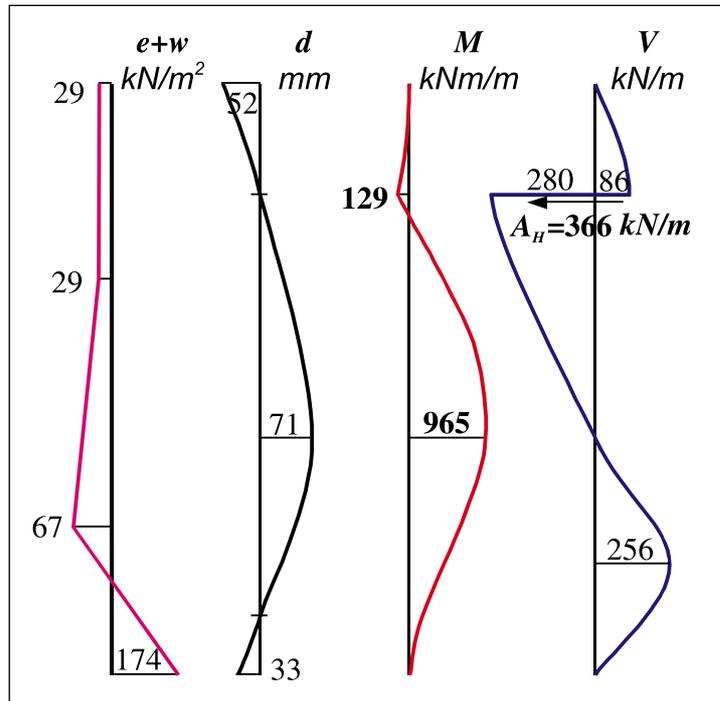
$\frac{L_A - L_{Ex}}{2}$
interpolation linéaire entre $\beta_{ex,1}$ et $\beta_{ex,2}$

Exemple de calcul

Le système et les sollicitations



Système



Résultats du calcul informatique (valeurs de calcul)

Il est prévu d'ancrer une palplanche double sur deux.

Il est prévu d'installer des tirants horizontaux, sous forme de barres lisses à filetage taraudé par refoulement, avec rondelles à bossages – par crainte de tassements éventuels.

Les autres palplanches doubles seront fixées à la lierne constituée de 2 U300, écartement 160 mm.

Choix des boulons et des tirants, dimensions des plaques d'appui

Fixation de la lierne: $F_{ed} = 1,26 \cdot 366 = 461 \text{ kN / DB}$
 choix: boulon $d_A = 2,25''$ (sans justification)
 choix: plaque $b_a / h_a / t_a = 140 / 220 / 40 \text{ mm / S355GP}$

Ancrage: $F_{ed} = 2 \cdot 1,26 \cdot 366 = 922 \text{ kN / DB}$
 choix: tirant $d_A = 3,0''$ (sans justification)
 choix: plaque $b_a / h_a / t_a = 140 / 220 / 85 \text{ mm / S355GP}$

Dans cet exemple, les boulons et les tirants ne font pas l'objet d'une justification. On admet que la nuance d'acier retenue permet la reprise des efforts dimensionnants.

Vérification des dimensions des plaques d'appui

$$b_a = 140 \text{ mm} \begin{cases} < b_c = 143 \\ > 0,90 \cdot b_c = 129 \end{cases} \quad h_a = 220 \text{ mm} \leq 2,5 \cdot b_a = 350$$

Plaques d'appui des boulons: $t_a = 40 \text{ mm} \begin{cases} > 2 \cdot t_F = 36 \\ > \min t_a = 40 \\ > d_A / 3 = 19 \end{cases}$

Plaques d'appui des tirants: $t_a = 85 \text{ mm} \begin{cases} > 2 \cdot t_F = 36 \\ > \min t_a = 40 \\ > d_A / 3 = 25 \end{cases}$

avec: $\gamma_{M0} = 1,0$

Vérification à la flexion des plaques d'appui des boulons

Avec: $d_A = 2,25''$ $\phi = 60 \text{ mm}$ $d' = 73 \text{ mm}$

et (type A): $X = h_a - d' = 220 - 73 = 147 \text{ mm}$

$$F_{Ed} \leq F_{Rd,pl} = \frac{4}{3}(b_a - \phi)X \cdot \left[\sqrt{1 + 3 \left(\frac{t_a}{X} \right)^2} - 1 \right] \cdot \frac{f_y}{\gamma_M} = \frac{4}{3}(140 - 60) \cdot 147 \cdot \left[\sqrt{1 + 3 \left(\frac{40}{147} \right)^2} - 1 \right] \cdot \frac{355}{1000 \cdot 1,0} = 587 \text{ kN} > 461$$

Vérification complémentaire: $F_{Ed} \leq \frac{\pi}{2\sqrt{2}}(d_{sw}^2 - \phi^2) \frac{f_y}{\gamma_M} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}}(85^2 - 60^2) \frac{355}{1000 \cdot 1,0} = 1429 \text{ kN} > 461$

Vérification à la flexion des plaques d'appui des tirants

avec: $n = 2$ $s = 160 \text{ mm}$

et: $d_A = 3,0''$ $\phi = 81 \text{ mm}$

et (type D): $X = \frac{h_a + 2(n-1)s}{2n-1} = \frac{220 + 2 \cdot 1 \cdot 160}{3} = 180 \text{ mm}$

$$F_{Ed} \leq F_{Rd,pl} = \frac{4}{3}(b_a - \phi) \frac{n}{2n-1} X \cdot \left[\sqrt{1 + 3 \left(\frac{t_a}{X} \right)^2} - 1 \right] \cdot \frac{f_y}{\gamma_M} = \frac{4}{3}(140 - 81) \frac{2}{3} 180 \cdot \left[\sqrt{1 + 3 \left(\frac{85}{180} \right)^2} - 1 \right] \cdot \frac{355}{1000 \cdot 1,0} = 978 \text{ kN} > 922$$

Vérification complémentaire: $F_{Ed} \leq d_s(b_a - \phi) \frac{f_y}{\gamma_M} = 50 \cdot (140 - 81) \frac{355}{1000 \cdot 1,0} = 1047 \text{ kN} > 922$

Détermination du facteur d'excentricité

$$\text{AZ-Profil: AZ36} \rightarrow EI = 173,88 \text{ MNm}^2 / \text{m}$$

$$C_{Ant} = 153,15 \text{ MN} / \text{m}^2$$

Sol au niveau de l'ancrage: sable moyennement compact $\rightarrow k_s = 80 \text{ MN} / \text{m}^3$

$$h_A = 3,0 \text{ m}$$

$$L_i = \sqrt[4]{4 \frac{EI}{k_s}} = 1,72 \text{ m} \rightarrow \frac{h_A}{L_i} = 1,75 \geq 1,00$$

$$\rightarrow C_{Sym} = k_s \cdot L_i \cdot 2 = 275 \text{ MN} / \text{m}^2$$

$$\rightarrow \alpha_{ex} = \frac{1}{1 + \frac{C_{Sym}}{C_{Ant}}} = 0,36$$

Vérification de la résistance de l'AZ36 sous l'effet de l'effort localisé

$$R_{Lock,Rk} = (h_a + 2b_a) \cdot K_L \cdot f_u \cdot \frac{1}{1 - \alpha_{ex}} = (220 + 2 \cdot 140) \cdot 2,37 \cdot \frac{410}{1000} \cdot \frac{1}{1 - 0,36} = 759 \text{ kN}$$

$$R_{Vf,Rk} = (h_a + b_a) \cdot t_F \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}} \cdot (1 + \alpha_{ex}) = (220 + 140) \cdot 18 \cdot \frac{270}{1000\sqrt{3}} \cdot (1 + 0,36) = 1374 \text{ kN}$$

$$R_{tw,Rk} = h_a \cdot t_W \cdot f_y \cdot (1 + \alpha_{ex}) = 220 \cdot 14 \cdot \frac{270}{1000} \cdot (1 + 0,36) = 1131 \text{ kN}$$

$$\rightarrow F_{Ed} = 461 \text{ kN} \leq R_{Rd,Ex,AZ} = \frac{\min(R_{Lock,Rk}; R_{Vf,Rk}; R_{tw,Rk})}{\gamma_{M0}} = \frac{759}{1,0} = 759 \text{ kN}$$

Remarque: La vérification vaut ici à la fois pour les plaques d'appui des boulons et pour les plaques d'appui des tirants, puisqu'elles ont les mêmes dimensions b_a et h_a .

Coefficient de réduction β_{ex} au point d'ancrage

$$\beta_{ex} = \sqrt{1 - (1 - \alpha_{ex}) \frac{F_{Ed}}{C_{Ex} \cdot f_y}} = \sqrt{1 - (1 - 0,36) \frac{366}{9,60 \cdot 355}} = 0,96$$

Vérification des sollicitations au point d'ancrage

$$\text{Palplanche AZ: AZ36 / S270GP} \rightarrow W_{el} = 3600 \text{ cm}^3 / \text{m} \rightarrow A_V = 94,2 \text{ cm}^2$$

Bien que l'on puisse considérer que la palplanche est de classe 1-2 selon l'EN 1993-5, la vérification est effectuée ici – en se plaçant du côté de la sécurité – pour le moment résistant élastique.

avec: $\phi = 81 \text{ mm}$ (on admet que le cas le plus défavorable est celui correspondant au plus grand affaiblissement de la section, au niveau de l'ancrage)

$$W_{el,Net} = W_{el,Brut} \cdot r_{W,el} = 3600 \cdot (1,0 - 1,3 \cdot 0,081) = 3221 \text{ cm}^3 / \text{m}$$

$$M_{Ed} \leq M_{c,Rd} = \beta_{ex,A} \cdot W_{el,Net} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,96 \cdot 3221 \cdot \frac{270}{1000 \cdot 1,0} = 835 \text{ kNm} / \text{m} > 129 \quad (\checkmark)$$

$$V_{Ed} \leq V_{Rd} = \beta_{ex,A} \cdot \frac{A_V}{\sqrt{3}} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,96 \cdot \frac{94,2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{270}{10 \cdot 1,0} = 1410 \text{ kN} / \text{m} > 280 \quad (\checkmark) \quad \frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} = 0,20 < 0,50 \quad (\checkmark)$$

Vérification des sollicitations en section courante

De manière simplifiée (avec $\beta_{ex,F} = \beta_{ex,A}$):

$$M_{c,Rd} = \beta_{ex,A} \cdot W_{el} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,96 \cdot 3600 \cdot \frac{270}{1000 \cdot 1,0} = 933 \text{ kNm/m} < M_{Ed} = 965$$

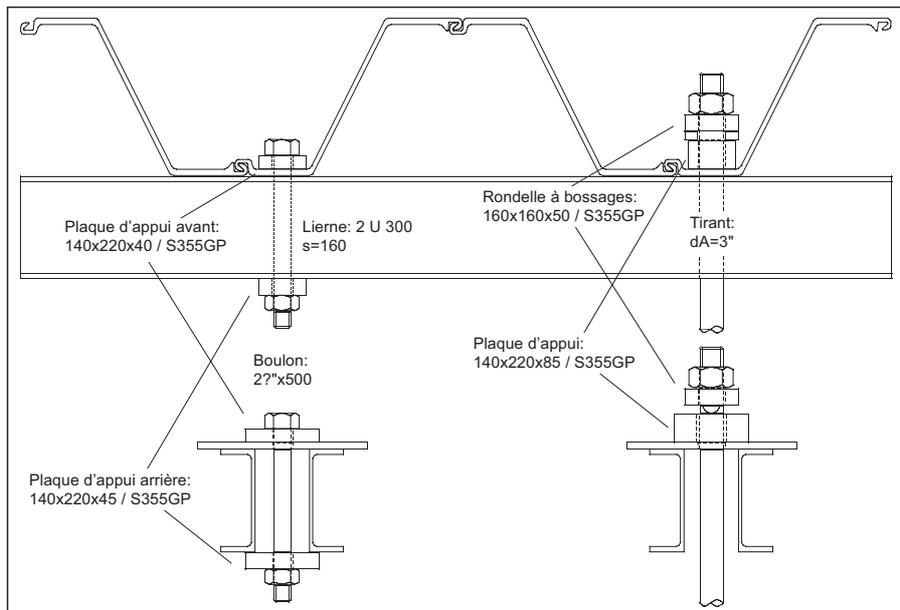
Avec une détermination plus précise de $\beta_{ex,F}$:

$$x = 6,60 \text{ m (distance tirant/section de moment maxi)} \quad L_{Ex} = 6,0 \text{ m} \quad \rightarrow x > \frac{L_{Ex}}{2} = 3,0 \text{ m} \quad \rightarrow \beta_{ex,F} = 1,0$$

$$M_{Ed} \leq M_{c,Rd} = \beta_{ex,A} \cdot W_{el} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 1,0 \cdot 3600 \cdot \frac{270}{1000 \cdot 1,0} = 972 \text{ kNm/m} > 965 \quad (\checkmark)$$

Remarque: Avec $\beta_{ex,F} = \beta_{ex,A}$ mais en prenant le moment résistant plastique, la vérification serait également satisfaite $M_{Ed} \leq M_{c,Rd} = 1088 \text{ kNm/m} > 965$.

En admettant en outre $\beta_{ex,F} = 1,0$ on obtient même; $M_{Ed} \leq M_{c,Rd} = 1133 \text{ kNm/m} > 965$.



Représentation schématique du système

Bibliographie

- [1] Exzentrische Lasteinleitung in Z-Bohlen, Endbericht mit Bemessungskonzept, Lehrstuhl für Stahlbau, RWTH Aachen, November 2002
- [2] Bestimmung der Ankerplattenabmessungen bei Spundwandbauwerken, Endbericht, Lehrs. für Stahlbau, RWTH Aachen, Februar 2004
- [3] Catalogue Anchrage, Anker Schroeder, Editions 1995-2003
- [4] Palplanches, Catalogue Général, ProfilArbed, Edition 2003
- [5] EAB, Empfehlungen Arbeitsausschuss Baugruben
- [6] DIN 18800, Stahlbauten, Deutsches Institut für Normung, November 1990
- [7] EN 1993-5, Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 5: Piling



Palplanches

66, rue de Luxembourg
L-4221 Esch-sur-Alzette (Luxembourg)
Tél.: (+352) 5313 3105
Fax: (+352) 5313 3290
E-mail: palplanches@arcelor.com
Internet: www.palplanche.com