



**VTT TECHNICAL RESEARCH  
CENTRE OF FINLAND**

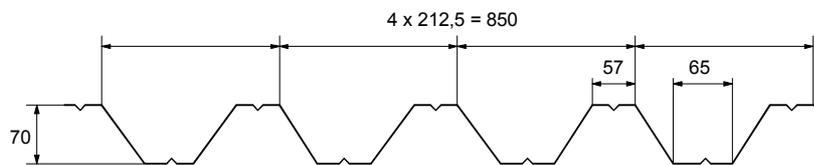
VTT BUILDING AND TRANSPORT  
Kemistintie 3, Espoo  
P.O.Box 1805, FIN-02044 VTT, Finland  
Telephone: + 358 9 4561  
Fax: + 358 9 456 7003

**FEUILLE DE CALCUL**

Affaire n°	R0SU00658	Page	1 sur 7	Rév	B
Nom Affaire	Projet de Valorisation CECA : Utilisation de l'Inox				
Sujet	<b>Exemple 3</b> – Calcul d'un bac de couverture à profil trapézoïdal portant sur deux travées				
Client CECA	Rédigé par	AAT	Date	Juin 2002	
	Vérifié par	JEK	Date	Juin 2002	
	Révisé par	JBL/MEB	Date	Avril 2006	

### EXEMPLE N°3 – CALCUL D'UN BAC DE COUVERTURE A PROFIL TRAPÉZOÏDAL PORTANT SUR DEUX TRAVÉES

Cet exemple concerne le calcul d'un bac de couverture à nervures trapézoïdales d'épaisseur 0,6 mm portant sur deux travées. Le matériau est un acier inoxydable de nuance 1.4401. Les dimensions du bac profilé sont données ci-dessous.



L'exemple décrit les étapes de calcul suivantes :

- détermination des caractéristiques de la section efficace à l'état limite ultime,
- détermination de la résistance à la flexion de la section transversale,
- détermination de la résistance sur l'appui intermédiaire,
- détermination des flèches à l'état limite de service.

Les notations et la terminologie employées dans cet exemple sont tirées de la prénorme prEN 1993-1-3:2005. Il convient de s'y référer pour disposer d'une description complète des procédures de dimensionnement et des figures associées.

#### Données de calcul

Longueur des travées	$L$	=	2900 mm
Largeur d'appuis	$s_s$	=	100 mm
Action de calcul	$Q$	=	1,4 kN/m <sup>2</sup>
Épaisseur de calcul	$t$	=	0,6 mm
Limite d'élasticité	$f_{yb}$	=	240 MPa
Module d'élasticité	$E$	=	200 000 MPa
Coefficient partiel	$\gamma_{M0}$	=	1,1
Coefficient partiel	$\gamma_{M1}$	=	1,1

Tableau 3.1

§ 3.2.4

Tableau 2.1

Tableau 2.1

Les notations et les dimensions détaillées utilisées dans les calculs sont explicitées à la figure ci-après. La position de la section transversale est donnée de telle manière qu'en flexion sur appui, la semelle supérieure soit comprimée.

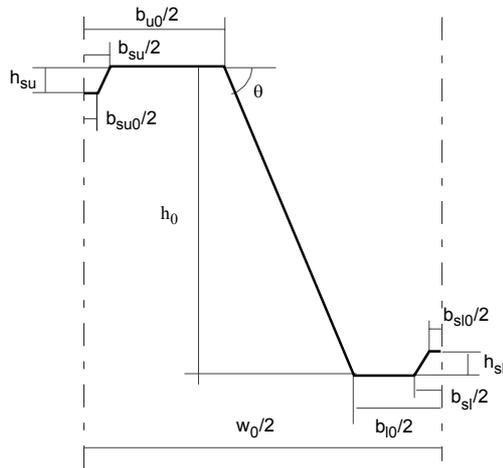


**VTT TECHNICAL RESEARCH  
CENTRE OF FINLAND**

VTT BUILDING AND TRANSPORT  
Kemistintie 3, Espoo  
P.O.Box 1805, FIN-02044 VTT, Finland  
Telephone: + 358 9 4561  
Fax: + 358 9 456 7003

**FEUILLE DE CALCUL**

Affaire n°	R0SU00658	Page	2 sur 7	Rév	B
Nom Affaire	Projet de Valorisation CECA : Utilisation de l'Inox				
Sujet	<b>Exemple 3</b> – Calcul d'un bac de couverture à profil trapézoïdal portant sur deux travées				
Client CECA	Rédigé par	AAT	Date	Juin 2002	
	Vérifié par	JEK	Date	Juin 2002	
	Révisé par	JBL/MEB	Date	Avril 2006	



Dimensions de la ligne d'épure :

- $h_0 = 70 \text{ mm}$
- $w_0 = 212,5 \text{ mm}$
- $b_{u0} = 65 \text{ mm}$
- $b_{l0} = 57 \text{ mm}$
- $b_{su} = 20 \text{ mm}$
- $b_{su0} = 8 \text{ mm}$
- $h_{su} = 6 \text{ mm}$
- $b_{sl} = 20 \text{ mm}$
- $b_{sl0} = 8 \text{ mm}$
- $h_{sl} = 6 \text{ mm}$
- Rayon intérieur des arrondis  
 $r = 3 \text{ mm}$

Inclinaison de l'âme:

$$\theta = \text{atan} \left| \frac{h_0}{0,5(w_0 - b_{u0} - b_{l0})} \right| = 57,1^\circ$$

**CARACTÉRISTIQUES DE LA SECTION EFFICACE À L'ÉTAT LIMITE ULTIME**

Vérification des rapports largeur-épaisseur maximums :

$h_0 / t = 117$  est inférieur à  $400 \sin \theta = 336$  et

$b_{l0} / t = 95$  est inférieur à 400.

§ 4.4

Tableau 4.1

Tableau 4.1

**Position de l'axe neutre lorsque l'âme est pleinement efficace**

Largeur efficace de la semelle comprimée :

$$b_p = \frac{b_{u0} - b_{su}}{2} = 22,5 \text{ mm} \quad \varepsilon = \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5} = 0,966$$

§ 4.4.1

$$k_\sigma = 4 \quad \bar{\lambda}_p = \frac{b_p / t}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} = 0,684$$

$$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,125}{\bar{\lambda}_p^2} = 0,862 \quad \text{Comme } \rho < 1, \quad b_{\text{eff},u} = \rho b_p = 19,4 \text{ mm}$$

Éq. 4.1a

Épaisseur réduite du raidisseur de semelle :

$$t_{su} = \frac{\sqrt{h_{su}^2 + \left( \frac{b_{su} - b_{su0}}{2} \right)^2}}{h_{su}} t = 0,849 \text{ mm}$$

§ 4.5.3



**VTT TECHNICAL RESEARCH  
CENTRE OF FINLAND**

VTT BUILDING AND TRANSPORT  
Kemistintie 3, Espoo  
P.O.Box 1805, FIN-02044 VTT, Finland  
Telephone: + 358 9 4561  
Fax: + 358 9 456 7003

**FEUILLE DE CALCUL**

Affaire n°	R0SU00658	Page	3 sur 7	Rév	B
Nom Affaire	Projet de Valorisation CECA : Utilisation de l'Inox				
Sujet	<b>Exemple 3</b> – Calcul d'un bac de couverture à profil trapézoïdal portant sur deux travées				
Client CECA	Rédigé par	AAT	Date	Juin 2002	
	Vérifié par	JEK	Date	Juin 2002	
	Révisé par	JBL/MEB	Date	Avril 2006	

$$A_s = (b_{\text{eff,u}} + b_{\text{su0}})t + 2h_{\text{su}}t_{\text{su}} = 26,6 \text{ mm}^2$$

$$e_s = \frac{b_{\text{su0}}h_{\text{su}}t + 2h_{\text{su}}\frac{h_{\text{su}}}{2}t_{\text{su}}}{A_s} = 2,23 \text{ mm}$$

$$I_s = 2(15t^2e_s^2) + b_{\text{su0}}t(h_{\text{su}} - e_s)^2 + 2h_{\text{su}}t_{\text{su}}\left(\frac{h_{\text{su}}}{2} - e_s\right)^2 + 2\left(\frac{15t^4}{12}\right) + \frac{b_{\text{su0}}t^3}{12} + 2\frac{t_{\text{su}}h_{\text{su}}^3}{12}$$

$$= 159,53 \text{ mm}^4$$

$$b_s = 2\sqrt{h_{\text{su}}^2 + \left(\frac{b_{\text{su}} - b_{\text{su0}}}{2}\right)^2} + b_{\text{su0}} = 25,0 \text{ mm}$$

$$l_b = 3,07\left(I_s b_p^2 \frac{2b_p + 3b_s}{t^3}\right)^{1/4} = 251 \text{ mm}$$

$$s_w = \sqrt{\left(\frac{w_0 - b_{u0} - b_{l0}}{2}\right)^2 + h_0^2} = 83,4 \text{ mm}$$

$$b_d = 2b_p + b_s \quad k_{w0} = \sqrt{\frac{s_w + 2b_d}{s_w + 0,5b_d}} = 1,37$$

$$l_b/s_w = 3,01 \quad \text{Comme } l_b/s_w > 2, \quad k_w = k_{w0} = 1,37$$

$$\sigma_{\text{cr,s}} = \frac{4,2k_w E}{A_s} \sqrt{\frac{I_s t^3}{4b_p^2(2b_p + 3b_s)}} = 515 \text{ MPa}$$

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{\text{cr,s}}}} = 0,683$$

$$\text{Comme } 0,65 < \bar{\lambda}_d < 1,38, \quad \chi = 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_d = 0,98$$

$$t_{\text{red,u}} = \chi t = 0,588 \text{ mm}$$

Distance de l'axe neutre par rapport à la semelle comprimée :

$$t_1 = \frac{\sqrt{h_{\text{sl}}^2 + \left(\frac{b_{\text{sl}} - b_{\text{sl0}}}{2}\right)^2}}{h_{\text{sl}}} t = 0,849 \text{ mm}$$

$$t_w = t / \sin \theta = 0,714 \text{ mm}$$

Fig. 4.3

Fig. 4.3

Éq. 4.9

Éqs. 4.10 et 4.11

Éq. 4.3

Éq. 4.15



**VTT TECHNICAL RESEARCH  
CENTRE OF FINLAND**

VTT BUILDING AND TRANSPORT  
Kemistintie 3, Espoo  
P.O.Box 1805, FIN-02044 VTT, Finland  
Telephone: + 358 9 4561  
Fax: + 358 9 456 7003

**FEUILLE DE CALCUL**

Affaire n°	R0SU00658	Page	4 sur 7	Rév	B
Nom Affaire	Projet de Valorisation CECA : Utilisation de l'Inox				
Sujet	<b>Exemple 3</b> – Calcul d'un bac de couverture à profil trapézoïdal portant sur deux travées				
Client CECA	Rédigé par	AAT	Date	Juin 2002	
	Vérifié par	JEK	Date	Juin 2002	
	Révisé par	JBL/MEB	Date	Avril 2006	

$$\begin{array}{ll}
 e_i = & A_i = \\
 0 & 0,5b_{\text{eff},u} t \\
 0 & 0,5b_{\text{eff},u} \chi t \\
 0,5h_{\text{su}} & h_{\text{su}} \chi t_{\text{su}} \\
 h_{\text{su}} & 0,5b_{\text{su}0} \chi t \\
 0,5h_0 & h_0 t_w \\
 h_0 & 0,5(b_{l0} - b_{sl}) t \\
 h_0 - 0,5h_{sl} & h_{sl} t_{sl} \\
 h_0 - h_{sl} & 0,5b_{sl0} t
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 A_{\text{tot}} = \sum A_i = 87,5 \text{ mm}^2 \\
 e_c = \frac{\sum A_i e_i}{A_{\text{tot}}} = 34,9 \text{ mm}
 \end{array}$$

**Section transversale efficace de la zone comprimée de l'âme**

§ 4.4.1

$$\psi = -\frac{h_0 - e_c}{e_c} = -1,006 \quad k_\sigma = 5,98(1 - \psi)^2 = 24,1$$

Tableau 4.3

$$b_p = h_0 / \sin \theta = 83,4 \text{ mm} \quad \bar{\lambda}_p = \frac{b_p / t}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} = 1,032$$

$$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,125}{\bar{\lambda}_p^2} = 0,630 \quad \text{Comme } \rho < 1, b_{\text{eff}} = \rho \frac{b_p}{1 - \psi} = 26,2 \text{ mm}$$

Éq. 4.1a  
Tableau 4.3

$$s_{\text{eff},l} = 0,4b_{\text{eff}} = 10,5 \text{ mm} \quad s_{\text{eff},n} = 0,6b_{\text{eff}} = 15,7 \text{ mm}$$

Tableau 4.3

**Propriétés de la section transversale efficace d'une demi-onde**

$$h_{\text{eff},l} = s_{\text{eff},l} \sin \theta \quad h_{\text{eff},n} = s_{\text{eff},n} \sin \theta$$

$$\begin{array}{lll}
 e_{\text{eff},i} = & A_{\text{eff},i} = & I_{\text{eff},i} \\
 0 & 0,5b_{\text{eff},u} t & 0 \\
 0 & 0,5b_{\text{eff},u} \chi t & 0 \\
 0,5h_{\text{su}} & h_{\text{su}} \chi t_{\text{su}} & \chi t_{\text{su}} h_{\text{su}}^3 / 12 \\
 h_{\text{su}} & 0,5b_{\text{su}0} \chi t & 0 \\
 0,5h_{\text{eff},l} & h_{\text{eff},l} t_w & t_w h_{\text{eff},l}^3 / 12 \\
 h_0 - 0,5(h_0 - e_c + h_{\text{eff},n}) & (h_0 - e_c + h_{\text{eff},n}) t_w & t_w (h_0 - e_c + h_{\text{eff},n})^3 / 12 \\
 h_0 & 0,5(b_{l0} - b_{sl}) t & 0
 \end{array}$$



**VTT TECHNICAL RESEARCH  
CENTRE OF FINLAND**

VTT BUILDING AND TRANSPORT  
Kemistintie 3, Espoo  
P.O.Box 1805, FIN-02044 VTT, Finland  
Telephone: + 358 9 4561  
Fax: + 358 9 456 7003

**FEUILLE DE CALCUL**

Affaire n°	R0SU00658	Page	5 sur 7	Rév	B
Nom Affaire	Projet de Valorisation CECA : Utilisation de l'Inox				
Sujet	<b>Exemple 3</b> – Calcul d'un bac de couverture à profil trapézoïdal portant sur deux travées				
Client CECA	Rédigé par	AAT	Date	Juin 2002	
	Vérfié par	JEK	Date	Juin 2002	
	Révisé par	JBL/MEB	Date	Avril 2006	

$$\begin{aligned}
 & \frac{h_0 - 0,5h_{sl}}{h_0 - h_{sl}} & \frac{h_{sl}t_{sl}}{0,5b_{sl}t} & \frac{t_{sl}h_{sl}^3 / 12}{0} \\
 A_{tot} = \sum A_{eff,i} &= 78,2 \text{ mm}^2 & e_c = \frac{\sum A_{eff,i} e_{eff,i}}{A_{tot}} &= 37,20 \text{ mm} \\
 I_{tot} = \sum I_{eff,i} + \sum A_{eff,i} (e_c - e_{eff,i})^2 &= 58\,400 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

En alternative, les caractéristiques de la section efficace peuvent également être redéfinies à partir d'itérations basées sur la position de l'axe neutre de la section efficace.

prEN 1993-1-3, Clause 5.5.3.3(3)

**Résistance à la flexion par unité de largeur (1 m)**

§ 4.7.4

$$I = \frac{1000 \text{ mm}}{0,5w_0} I_{tot} = 549\,000 \text{ mm}^4$$

$$W_u = \frac{I}{e_c} = 14\,800 \text{ mm}^3$$

$$W_1 = \frac{I}{h_0 - e_c} = 16\,800 \text{ mm}^3$$

Comme :  $W_u < W_1$ ,

$$W_{eff,min} = W_u = 14\,800 \text{ mm}^3$$

$$M_{c,Rd} = W_{eff,min} f_y / \gamma_{M0} = 3,22 \text{ kNm}$$

Éq. 4.29

**DÉTERMINATION DE LA RÉSISTANCE SUR L'APPUI INTERMÉDIAIRE**

**Résistance de l'âme à l'écrasement localisé**

§ 5.4.4

Ici  $\varphi = \theta$

$$l_a = s_s \quad \text{et} \quad \alpha = 0,15$$

prEN 1993-1-3, Éq. 6.19b et 6.20c

$$\begin{aligned}
 R_{w,Rd} &= \alpha t^2 \sqrt{f_{yb} E} \left( 1 - 0,1 \sqrt{\frac{r}{t}} \right) \left( 0,5 + \sqrt{0,02 \frac{l_a}{t}} \right) \left[ 2,4 + \left( \frac{\phi}{90 \text{ deg}} \right)^2 \right] \frac{1}{\gamma_{M1}} \frac{1000 \text{ mm}}{0,5w_0} \\
 &= 16,2 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

prEN 1993-1-3, Éq. 6.18

**Interaction du moment fléchissant et de la réaction d'appui**

Actions pondérées par unité de largeur (1m) :

$$\gamma_G = 1,35 \quad \gamma_Q = 1,5 \quad \text{Poids propre : } G = 70 \text{ N/m}^2$$

§ 2.3.2

$$q = (\gamma_G G + \gamma_Q Q) = 2,20 \text{ kN/m}$$

Éq. 2.3



**VTT TECHNICAL RESEARCH  
CENTRE OF FINLAND**

VTT BUILDING AND TRANSPORT  
Kemistintie 3, Espoo  
P.O.Box 1805, FIN-02044 VTT, Finland  
Telephone: + 358 9 4561  
Fax: + 358 9 456 7003

**FEUILLE DE CALCUL**

Affaire n°	R0SU00658	Page	6 sur 7	Rév	B
Nom Affaire	Projet de Valorisation CECA : Utilisation de l'Inox				
Sujet	<b>Exemple 3</b> – Calcul d'un bac de couverture à profil trapézoïdal portant sur deux travées				
Client CECA	Rédigé par	AAT	Date	Juin 2002	
	Vérfié par	JEK	Date	Juin 2002	
	Révisé par	JBL/MEB	Date	Avril 2006	

$$M_{Ed} = \frac{qL^2}{8} = 2,31 \text{ kNm}$$

$$F_{Ed} = \frac{5}{4}qL = 7,96 \text{ kN}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = 0,716$$

$$\frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd}} = 0,491$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} + \frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd}} = 1,21$$

L'interaction du moment fléchissant et de la réaction d'appui satisfait les conditions :

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

$$\frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd}} \leq 1$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} + \frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd}} \leq 1,25$$

prEN 1993-1-3, Éq. 6.28a-c

**DÉTERMINATION DES FLÈCHES À L'ÉTAT LIMITE DE SERVICE (ELS)**

**Caractéristiques de la section efficace**

Pour les vérifications à l'ELS, il convient de déterminer la largeur efficace des parois comprimées pour la contrainte de compression dans la paroi due au chargement à l'état limite de service.

prEN 1993-1-3, clause 5.5.1(4)

Contrainte de compression maximale dans la section efficace à l'ELS. Une approximation plaçant en sécurité est faite en se basant sur  $W_u$  déterminé ci-dessus pour l'état limite ultime.

$$M_{y,Ed,ser} = \frac{(G+Q)L^2}{8} = 1,55 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{com,Ed,ser} = \frac{M_{y,Ed,ser}}{W_u} = 105 \text{ MPa}$$

§ 2.3.4

Les caractéristiques de la section efficace sont déterminées comme pour l'état limite ultime, sauf que  $f_{yb}$  est remplacé par  $\sigma_{com,Ed,ser}$  et que l'épaisseur du raidisseur de semelle n'est pas réduite.

Les résultats du calcul sont :

Largeur efficace de la semelle comprimée :

La semelle est pleinement efficace

Position de l'axe neutre lorsque l'âme est pleinement efficace :

$$e_c = 34,1 \text{ mm}$$

Section transversale efficace de la zone comprimée de l'âme :

L'âme est pleinement efficace.

Partie efficace de l'âme :

L'âme est réduite  
( $\rho = 0,88$ )

Caractéristiques de la section efficace pour une demi-onde :

$$A_{tot} = 86,6 \text{ mm}^2$$

$$e_c = 34,8 \text{ mm}$$

$$I_{tot} = 63\,700 \text{ mm}^4$$

Caractéristiques de section efficace par unité de largeur (1 m)

$$I = 600\,000 \text{ mm}^4$$



**VTT TECHNICAL RESEARCH  
CENTRE OF FINLAND**

VTT BUILDING AND TRANSPORT  
Kemistintie 3, Espoo  
P.O.Box 1805, FIN-02044 VTT, Finland  
Telephone: + 358 9 4561  
Fax: + 358 9 456 7003

**FEUILLE DE CALCUL**

Affaire n°	R0SU00658	Page	7 sur 7	Rév	B
Nom Affaire	Projet de Valorisation CECA : Utilisation de l'Inox				
Sujet	<b>Exemple 3</b> – Calcul d'un bac de couverture à profil trapézoïdal portant sur deux travées				
Client CECA	Rédigé par	AAT	Date	Juin 2002	
	Vérifié par	JEK	Date	Juin 2002	
	Révisé par	JBL/MEB	Date	Avril 2006	

$$W_u = 17\,300 \text{ mm}^4$$

$$W_l = 17\,300 \text{ mm}^4$$

**Détermination de la flèche**

Module d'élasticité sécant correspondant à la valeur maximale du moment fléchissant :

$$\sigma_{1,Ed,ser} = \frac{M_{y,Ed,ser}}{W_u} = 89,5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{2,Ed,ser} = \frac{M_{y,Ed,ser}}{W_l} = 90,8 \text{ MPa}$$

$$E_{s,1} = \frac{E}{1 + 0,002 \frac{E}{\sigma_{1,Ed,ser}} \left( \frac{\sigma_{1,Ed,ser}}{f_{yb}} \right)^n} = 199 \text{ GPa} \quad n = 7,0$$

$$E_{s,2} = \frac{E}{1 + 0,002 \frac{E}{\sigma_{2,Ed,ser}} \left( \frac{\sigma_{2,Ed,ser}}{f_{yb}} \right)^n} = 199 \text{ GPa}$$

$$E_{s,ser} = \frac{E_{s,1} + E_{s,2}}{2} = 199 \text{ GPa}$$

Vérification de la flèche :

Par simplification en se plaçant du côté de la sécurité, la variation de  $E_{s,ser}$  le long du bac est négligée.

$$x = \frac{1 + \sqrt{33}}{16} L = 1,22 \text{ m (position de la flèche maximale)}$$

$$\delta = \frac{(G + Q)L^4}{48E_{s,ser}I} \left( \frac{x}{L} - 3 \frac{x^3}{L^3} + 2 \frac{x^4}{L^4} \right) = 4,7 \text{ mm}$$

La flèche admissible est  $L/200 = 14,5 \text{ mm}$ , par conséquent la flèche calculée est acceptable.

Annexe C

Annexe C  
Tableau C.1

Annexe C

