



**CONSULT**

**Iv-Consult b.v.**

NOORDHOEK 37, POSTBUS 1155

3350 CD PAPENDRECHT, NEDERLAND

TELEFOON (078) 641 05 55

TELEFAX (078) 641 00 88

mail@iv-consult.nl

**Opdrachtgever      Staalbouw Huys BV en Profielservice NV**

**Project              Feybec-profiel**  
Plaatligger met geprofileerd lijf

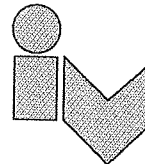
**Onderdeel          Ontwerphandleiding**

Project / doc. nr.      602050 / 2100 / rev. 0

Voor commentaar	S. Wierda	Th. v.d. Tol	A. Lanser	300902	0
Omschrijving	Opgesteld	Gecontroleerd	Projectleider	Datum	Revisie

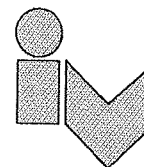
ES QAG-FORM.008





## INHOUDSOPGAVE

1.	Inleiding.....	3
2.	Uitgangspunten.....	4
2.1	Normen en aanbevelingen.....	4
2.2	Publicaties.....	4
2.3	Toepassingsgebied .....	5
2.4	Symbolen.....	6
3.	Doorsnede capaciteiten.....	7
3.1	Torsie.....	7
3.1.1.	Algemeen.....	7
3.1.2.	Torsietraagheidsmoment .....	7
3.1.3.	Wellingstraagheidsmoment.....	7
3.2	Moment en normaalkracht.....	8
3.2.1.	Algemeen.....	8
3.2.2.	Flensbuiging Mz.....	8
3.2.3.	Toelaatbare normaalkracht in de flenzen .....	9
3.2.4.	Toetsing van de flenzen.....	10
3.3	Dwarskracht.....	11
3.3.1.	Algemeen.....	11
3.3.2.	Reductiefactor dwarskrachtcapaciteit.....	11
3.3.3.	Plooicoëfficiënten $k_p$ .....	12
3.3.4.	Toelaatbare dwarskracht in het lijf.....	13
3.3.5.	Toetsing van het lijf.....	13
4.	Rekenvoorbeeld.....	14



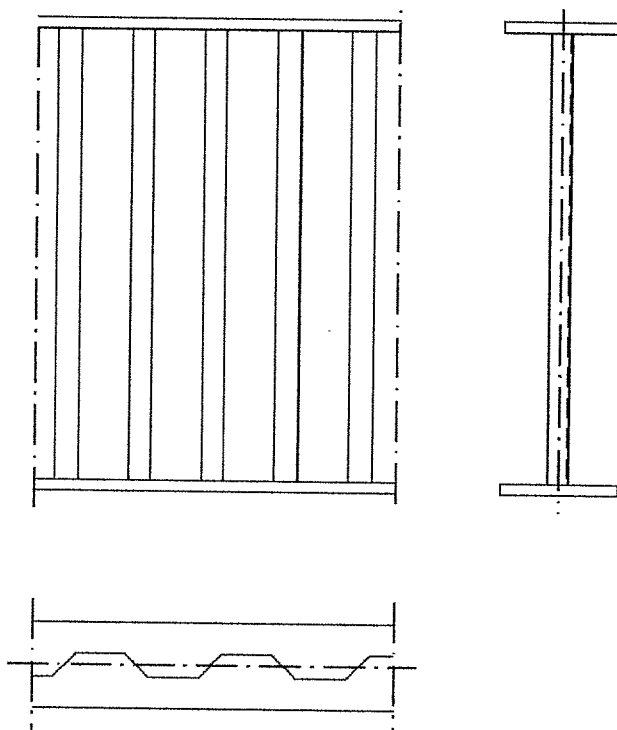
## 1. INLEIDING

Er is een toenemende vraag naar lichte en tegelijkertijd economische constructievormen in de staalbouw. Hiertoe behoren gelaste plaatliggers met een geprofileerd lijf. Door het profiel wordt plooiën verhinderd en kan het lijf dun uitgevoerd worden.

In Scandinavië en Duitsland worden deze liggers al veelvuldig toegepast. Het optimale toepassingsgebied ligt in de staalbouw daar waar tot nu toe walsprofielen hoger dan 500 mm worden toegepast.

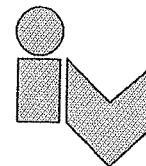
In Nederland kent de huidige TGB nog geen rekeningregels voor dergelijke profielen.

In opdracht van Staalbouw Huys BV en Profielservice NV is door Iv-Consult een praktische ontwerphandleiding opgesteld voor het ontwerpen van plaatliggers met een trapeziumvormig lijf.



*Plaatligger met trapeziumvormig lijf*

Als uitgangspunt voor de berekening is de DAST-Richtlinie 015 (Träger mit slanken Stegen) gekozen. Deze (voor)norm is gebaseerd op Duitse en Zweedse studies en praktijk proeven. Zoveel mogelijk zijn de eisen toegespitst op de Nederlandse bouwregelgeving.



## 2. UITGANGSPUNTEN

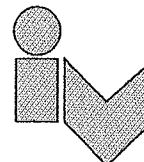
### 2.1 Normen en aanbevelingen

NEN 6770	TGB 1990	Basisrekenregels
NEN 6771	TGB 1990	Stabiliteit
NEN 6772	TGB 1990	Verbindingen
DAST-Richtlinie 015		Träger mit slanken Stegen, 1990
StBK N5		Swedish Code for Light-Gauge Metal Structures, 1982

### 2.2 Publicaties

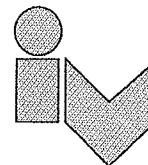
- [1] Rainer Aschinger    Tragverhalten von geschweißten I-Trägern mit trapezförmig profilierten Stegen bei Torsion, Biegung und Normalkraft  
ISBN 3-8265-0689-8 (1994)
- [2] J. Lindner            Beulwerte für trapezförmig profilierte Bleche unter Schubbeanspruchung  
Stahlbau 64 (1995)
- [3] AiF Nr. 10333N       Trapezstegträger mit Steg-Gurt-Verbindung mit mechanischen Verbindungsmitteln  
Technische Universität Braunschweig (1997)

Een uitgebreid literatuuroverzicht is opgenomen in Bijlage A.

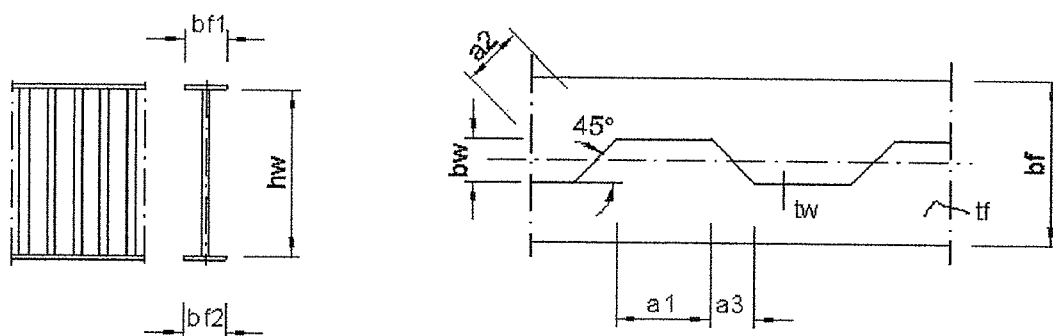


### 2.3 Toepassingsgebied

Fabricage DAST 015 (102)	Het ontwerp, de uitvoering en de conservering moeten zodanig zijn dat gedurende de referentieperiode de constructie stabiel en geschikt voor gebruik is. Het toepassen van liggers met dunne lijven vraagt speciale kennis en zorgvuldigheid.				
Conservering DAST 015 (102, 8.)	Zoals gebruikelijk in de staalbouw.				
Staalsoorten DAST 015 (105)	De liggers moeten gemaakt zijn van de staalsoorten S235 of S355 volgens NEN-EN 10025.				
Belastingen DAST 015 (104)	De liggers mogen alleen toegepast worden in overwegend statisch belaste constructies.				
Bruikbaarheidsgrenstoestand DAST 015 (106)	Bij het bepalen van de vervormingen moet gerekend worden met dwarskrachtvervorming van het lijf.				
Normaalkrachten DAST 015 (108)	Uitgegaan wordt van liggers welke voornamelijk op buiging worden belast. Eventuele normaalkrachten moeten zodanig zijn dat hoogstens een van de flenzen op druk wordt belast.				
Rekenmodel DAST 015 (110)	De krachten moeten volgens de elasticiteitstheorie worden berekend.				
Kipsteunen DAST 015 (112)	De rekenregels zijn erop gebaseerd dat beide flenzen bij de opleggingen zijdelings gehouden zijn. In de berekening is de kipcontrole vereenvoudigd door de gedrukte rand als knikstaaf te controleren. Indien nodig moeten ook in het veld kipsteunen toegepast worden.				
Lassen DAST 015 (402)	Het lijf moet doorlopend gelast worden aan beide flenzen. Het lijf mag van een zijde gelast worden.				
Minimum plaatdikten DAST 015 (119)	De minimum lijfdikte is 1 mm.				
Hoogte / dikte verhouding lijf DAST 015 (120)	De maximale hoogte / dikte verhouding voor lijven is: <table><tr><td>S235</td><td>800</td></tr><tr><td>S355</td><td>560</td></tr></table> <p><i>Deze beperking is ingevoerd omdat bij zeer slanke lijven is gebleken dat plooi van het lijf tot knik van de gedrukte flens over de zwakke as leidt.</i></p>	S235	800	S355	560
S235	800				
S355	560				
Liggerhoogte DAST 015 (121)	De totale liggerhoogte mag niet meer zijn dan 3500 mm				
Flenzen DAST 015 (403)	De flenzen moeten symmetrisch aan het lijf verbonden zijn. De onder- en bovenflens mogen verschillend zijn.				
Statisch systeem	Alle liggers zijn liggers over twee steunpunten.				

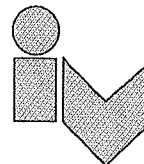


## 2.4 Symbolen



*Symbolen plaatlijger met geprofileerd lijf*

*Aangenomen wordt dat '1' de drukflens en '2' de trekflens is*



### 3. DOORSNEDE CAPACITEITEN

#### 3.1 Torsie

##### 3.1.1. Algemeen

In de normale staalbouw is torsie als belastinggeval niet relevant. Voor de toetsing van de kipstabiliteit zijn, indien gekozen wordt voor een nauwkeurige berekening, het torsietraagheidsmoment en het welvingstraagheidsmoment van belang.

##### 3.1.2. Torsietraagheidsmoment

Het torsietraagheidsmoment is voor de geprofileerde ligger gelijk aan een ligger met een vlak lijf, omdat op elke willekeurige snede het profiel open is. Ook uit onderzoeken is niet gebleken dat er enige vorm van kokerligger werking zou zijn. Zie verder [1: 4.8]

$$I_t = \frac{1}{3} \sum b \cdot t^3$$

$$I_t = \frac{1}{3} \cdot (h_w \cdot t_w^3 + b_{f1} \cdot t_{f1}^3 + b_{f2} \cdot t_{f2}^3)$$

##### 3.1.3. Welvingstraagheidsmoment

In [1] is op grond van theoretische eindige elementenberekeningen en praktijkproeven een vereenvoudigde formule gevonden:

$$I_{wa} = \min I_{wa} + c_w \cdot \frac{L^2}{E \pi^2}$$

waarin  $\min I_{wa}$  het welvingstraagheidsmoment voor I-profielen is:

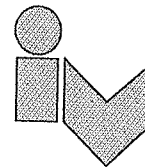
$$\min I_{wa} = \frac{I_{z1} \cdot I_{z2}}{I_{z1} + I_{z2}} \cdot h_m^2 \quad [m^6]$$

$$c_w = \frac{b_w^2 \cdot h_m^2}{8 \cdot u \cdot (a_1 + a_3)} \quad [kNm^2]$$

$$u = \frac{h_m}{2 \cdot G \cdot a_1 \cdot t_w} + \frac{h_m^2 \cdot (a_1 + a_3)^3}{600 \cdot a_1^2 \cdot E} \cdot \frac{I_{y1} + I_{y2}}{I_{y1} \cdot I_{y2}} \quad [m/kN]$$

Met behulp van bovengenoemde formules kan de geprofileerde ligger doorgerekend worden als een normale ligger met een vlak lijf.





## 3.2 Moment en normaalkracht

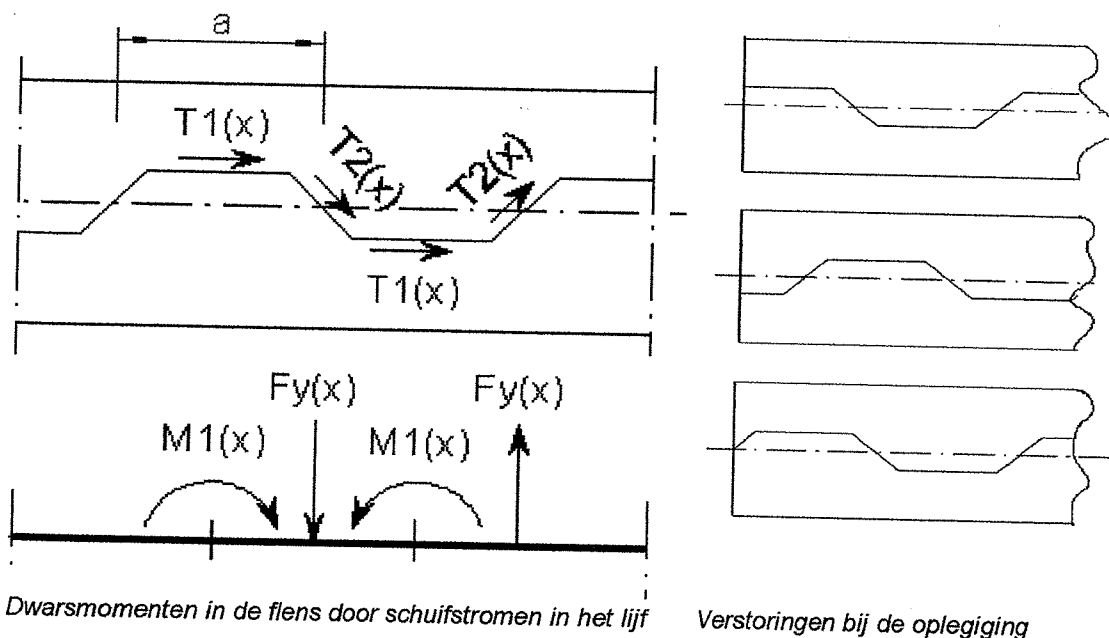
### 3.2.1. Algemeen

Op grond van de profilering onttrekt het lijf zich nagenoeg volledig aan het meewerken van de afdracht van langsnormaalspanningen uit buiging om de sterke as. Dit betekent dat statisch gezien de plaatligger met geprofileerd lijf zich gedraagt als een vakwerkligger. De buigende momenten en normaalkrachten worden alleen door de flenzen opgenomen en de dwarskracht alleen door het, in dit geval geprofileerde, lijf.

De momentcapaciteit wordt bepaald door het bereiken van de knik- en/of plooispanning in de drukflens of door het bereiken van de vloeispanning in de trekflens. Hierbij moet rekening worden gehouden met de momenten uit het vlak, welke ontstaan door de vorm van het lijf.

Uitgegaan wordt van liggers welke voornamelijk op buiging worden belast. Eventuele normaalkrachten moeten zodanig zijn dat hoogstens een van de flenzen op druk wordt belast.

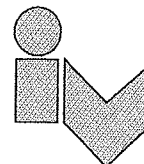
### 3.2.2. Flensbuiging $M_z$



Algemeen geldt:

$$M_z = M_1(x) + 0.5F_y(x) \cdot a$$

Het bepalen van de exacte waarde van  $M_z$  is een tijdrovende klus. Deze waarde wordt beïnvloed door de wijze waarop het lijf eindigt bij de opleggingen en, in geval van puntlasten, de plaats waar de belasting t.o.v. het geprofileerde lijf ingeleid wordt.



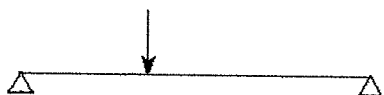
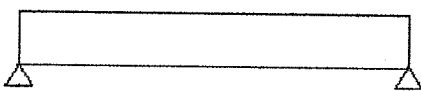
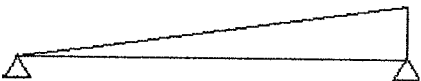
Indien afgezien wordt van een nauwkeurige berekening kunnen de praktijkformules uit [1] uitkomst bieden. Met deze formules worden alle voorkomende gevallen gedekt.

Vereenvoudigd geldt:

$$M_Z = \text{factor}_M \cdot \max M_1 + \text{factor}_F \cdot \max F_y$$

$$\max F_y = \max V_z \cdot \frac{b_w}{h_w}$$

$$\max M_1 = \max V_z \cdot \frac{a_1}{h_w} \cdot \frac{b_w}{2}$$

Belasting	Factor M	Factor F [m]
 <i>Puntlast</i>	1.50	0.130
 <i>Gelijkmatig verdeelde belasting</i>	0.60	0.065
 <i>Driehoeks belasting</i>	0.50	0.065

### 3.2.3. Toelaatbare normaalkracht in de flenzen

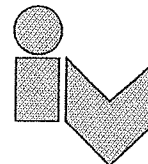
De invloed van de buigende momenten uit het vlak worden in rekening gebracht door de rekenwaarde van de toelaatbare spanning in de flenzen te reduceren.

Voor de drukflens geldt:

$$f_{y,1,r} = \left( 1 - 0.4 \sqrt{\frac{\sigma_{x,1}(M_Z)}{f_{y,1,d}}} \right) \cdot f_{y,1,d}$$

Voor de trekflens geldt:

$$f_{y,2,r} = \left( 1 - 0.4 \sqrt{\frac{\sigma_{x,2}(M_Z)}{f_{y,2,d}}} \right) \cdot f_{y,2,d}$$



De invloed van lokaal plooiën van de drukflens wordt in rekening gebracht door alleen de meewerkende breedte in rekening te brengen. Voor een driezijdig scharnierend opgelegd plaatveld met een vrije langstrand is de plooiëfficiënt  $k_p = 0.43$ . Omdat het lijf geprofileerd is mag deze waarde verhoogd worden naar 0.60 (zie DAST-Richtlinie 015: K208). De effectieve breedte is de som van minimale uitkraging t.o.v. het lijf en de effectieve breedte van de maximale uitkraging t.o.v. het lijf.

Meewerkende breedte  
(zie ook NEN 6771: 13.3)

$$b_{ef,1} = \frac{b_{f,1} - b_w}{2} + 0.60 \cdot t_{f,1} \cdot \sqrt{\frac{E_d}{f_{y,f,d}}} \quad b_{ef,1} \leq b_{f,1}$$

De invloed van globale knik van de drukflens wordt in rekening gebracht door de gedrukte rand als knikstaaf te controleren. Deze werkwijze komt overeen met NEN 6771: 12.2.5.2. Uit de gesteunde lengte en de effectieve traagheidsstraal volgt de knikfactor volgens NEN 6770: 12.1. Als instabiliteitskromme moet c worden aangehouden.

Traagheidsstraal:

$$i_{ef,1} = \frac{b_{ef,1}}{\sqrt{12}}$$

De capaciteit van de flenzen is:

Drukflens:

$$N_{R,1,d} = \omega_{z,buc,1} \cdot b_{ef,1} \cdot t_{f,1} \cdot f_{y,1,r}$$

Trekflens:

$$N_{R,2,d} = b_{f,2} \cdot t_{f,2} \cdot f_{y,2,r}$$

### 3.2.4. Toetsing van de flenzen

Voldaan moet zijn aan:

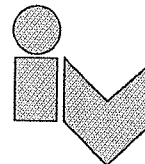
$$\frac{N_{s,1,d}}{N_{R,1,d}} \leq 1$$

$$\frac{N_{s,2,d}}{N_{R,2,d}} \leq 1$$

Waarin:

$$N_{s,1,d} = N_{s,d} \cdot \frac{A_{ef,1}}{A_{ef,1} + A_{f,2}} + \frac{M_{y,s,d}}{h_m}$$
$$N_{s,2,d} = N_{s,d} \cdot \frac{A_{f,2}}{A_{ef,1} + A_{f,2}} + \frac{M_{y,s,d}}{h_m} \quad \text{moet trek zijn}$$

$h_m$  is de zwaartepuntsafstand van de flenzen



### 3.3 Dwarskracht

#### 3.3.1. Algemeen

Op grond van de profilering onttrekt het lijf zich nagenoeg volledig aan het meewerken van de afdracht van langsnormaalspanningen uit buiging om de sterke as. Dit betekent dat statisch gezien de plaatligger met geprofileerd lijf zich gedraagt als een vakwerklijgger.

De buigende momenten en normaalkrachten worden alleen door de flenzen opgenomen en de dwarskracht alleen door het, in dit geval geprofileerde, lijf.

De dwarskrachtcapaciteit wordt bepaald door het bereiken van de vloeischuif of de plooispanning in het lijf.

Bij schuifplooi kan lokaal plooiën van een of meerdere ribben van het trapeziumlijf of globaal plooiën van het gehele trapeziumveld optreden. In het laatste geval kan het lijf als een orthotrope plaat beschouwd worden.

#### 3.3.2. Reductiefactor dwarskrachtcapaciteit

In de DAST 015 is een reductiefactor van 0.6 voor de vloeigrens opgenomen. Deze is opgenomen in formules (405), (410) en (411):

$$V_{R.1.d} = 0.35 \cdot \kappa_{\tau,l} \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} \cdot h \cdot t \quad \text{DAST 015: vergelijking (410); lokaal plooiën}$$

$$V_{R.g.d} = 0.35 \cdot \kappa_{\tau,g} \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} \cdot h \cdot t \quad \text{DAST 015: vergelijking (411); globaal plooiën}$$

$$V_{R.d} = \frac{f_{y,k}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_M} \cdot \dots \quad \text{Normaal geldt deze formule}$$

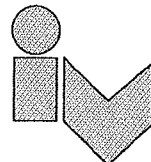
Gerekend wordt derhalve met een reductiefactor groot  $0.35 \cdot \sqrt{3} = 0.6$

Deze reductiefactor is het minimum van de verhouding tussen de met (Zweedse, Finse en Duitse) proeven bepaalde draagkracht en de rekenkundige draagkracht voor zowel lokaal als globaal plooiën. Alhoewel de rekenprocedure volgens de Zweedse norm StBK N5 gelijk is aan die volgens de DAST, wordt er in Zweden niet gerekend met een reductiefactor.

In [3] is op grond van uitgebreide proeven aangetoond dat voor lokaal plooiën de factor 0.6 veel te conservatief is. Voorgesteld wordt te rekenen met een reductiefactor van 0.85. Deze aanbeveling is gebaseerd op gedegen onderzoek en wordt in dit rapport overgenomen.

Voor globaal plooiën zijn geen recente onderzoeksresultaten bekend en wordt met 0.6 gerekend. Overigens is volgens [2] globaal plooiën in het algemeen niet maatgevend bij de in de staalbouw gebruikelijke afmetingen.





Voor globaal plooiën wordt direct gerekend met de ideale kritieke plooi-schuifspanning volgens formule (415):

$$\tau_{p.i.g} = \frac{32.4}{t \cdot h^2} \sqrt[4]{D_x D_y^3} \quad \text{DASt 015: vergelijking (415); globaal plooiër}$$

De termen  $D_x$  en  $D_y$  zijn de orthotrope plaatstijfheden in en uit het vlak van het lijf.

### 3.3.4. Toelaatbare dwarskracht in het lijf

De capaciteit van het lijf is:

Locaal plooiën:  $V_{R.d.l} = 0.85 \kappa_{\tau.l} \tau_{u.d} h_w t_w$

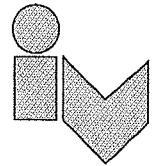
Globaal plooiën:  $V_{R.d.g} = 0.60 \kappa_{\tau.g} \tau_{u.d} h_w t_w$

Waarin  $\kappa_{\tau} \tau_{u.d}$  de rekenwaarde voor de plooi-spanning met betrekking tot de capaciteit in de uiterste grenstoestand volgens NEN 6771: 13.8.1 is.

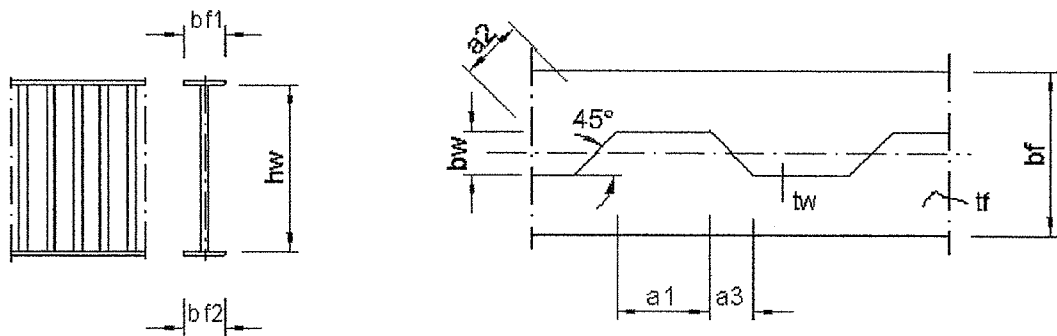
### 3.3.5. Toetsing van het lijf

Voldaan moet zijn aan:  $\frac{V_{z.s.d}}{V_{R.d.l}} \leq 1$

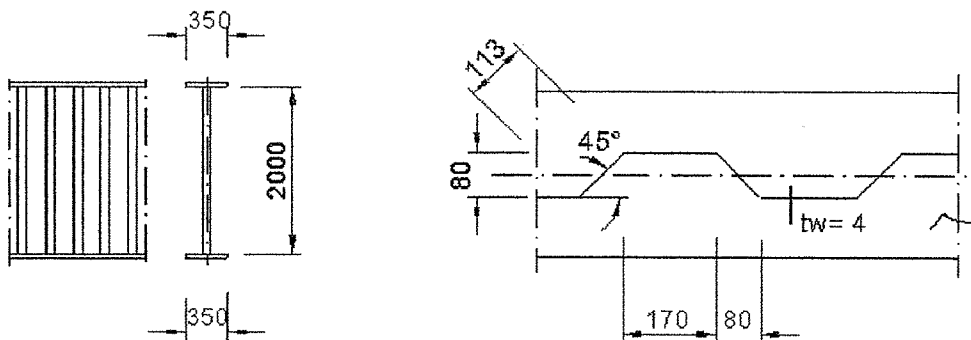
$$\frac{V_{z.s.d}}{V_{R.d.g}} \leq 1$$



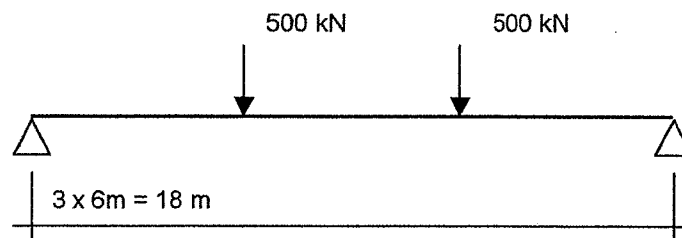
#### 4. REKENVOORBEELD



*Symbolen plaatligger met geprofileerd lijf - '1' is de drukflens en '2' de trekflens*

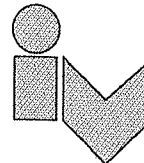


*Afmetingen plaatligger met geprofileerd lijf. De flenzen zijn van S355 en het lijf is van S235*



*Overspanning en rekenwaarde van de belasting. De drukflens is gesteund t.p.v. de belasting.*

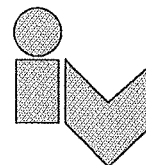
*De berekeningen zijn gemaakt met Mathcad, zie volgende bladen.*



## Invoergegevens

Materiaalgrootheden:	Elasticiteitsmodulus:	$E_d := 2.1 \cdot 10^5 \cdot \text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$	$G := 0.81 \cdot 10^5 \cdot \text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$
	Poissonfactor:	$\nu_d := 0.3$	
	Vloei grens lijf:	$f_{y,w,d} := 235 \cdot \text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$	
	Vloei grens flenzen:	$f_{y,f,d} := 355 \cdot \text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$	
Ligger afmetingen:	Lijf hoogte en dikte:	$h_w := 2000 \text{ mm}$	$t_w := 4 \text{ mm}$
	Trapezium vorm:	$b_w := 80 \text{ mm}$	$a_1 := 170 \text{ mm}$
		$a_3 := b_w$	$a_2 := b_w \cdot \sqrt{2}$ $a_2 = 113 \text{ mm}$
	Flenzen:	$b_{f,1} := 350 \text{ mm}$	$t_{f,1} := 20 \text{ mm}$
		$b_{f,2} := 350 \text{ mm}$	$t_{f,2} := 20 \text{ mm}$
Overspanning:		$l := 18 \text{ m}$	
H.o.h. steunen drukrand:		$c := 6 \text{ m}$	
Belasting twee puntlasten:		$F_{z,s,d} := 500 \text{ kN}$	
Rekenwaarde van het moment:		$M_{y,s,d} := F_{z,s,d} \cdot c$	$M_{y,s,d} = 3000 \text{ kN} \cdot \text{m}$
Rekenwaarde van de dwarskracht:		$V_{z,s,d} := F_{z,s,d}$	$V_{z,s,d} = 500 \text{ kN}$
Rekenwaarde van de normaalkracht in de flenzen:		$N_{s,1,d} := \frac{M_{y,s,d}}{h_w + 0.5(t_{f,1} + t_{f,2})}$	$N_{s,1,d} = 1485 \text{ kN}$
		$N_{s,2,d} := \frac{M_{y,s,d}}{h_w + 0.5(t_{f,1} + t_{f,2})}$	$N_{s,2,d} = 1485 \text{ kN}$





## Toetsing van de flenzen

Omdat beide flenzen gelijk zijn wordt alleen de drukrand getoetst

Meewerkende breedte: 
$$b_{ef,1} := \min \left[ \left( \frac{b_{f,1} - b_w}{2} + 0.60 \cdot t_{f,1} \cdot \sqrt{\frac{E_d}{f_{y,f,d}}} \right), b_{f,1} \right]$$

$b_{ef,1} = 350 \text{ mm}$

Traagheidsstraal: 
$$i_{ef,1} := \frac{b_{ef,1}}{\sqrt{12}}$$

$i_{ef,1} = 101 \text{ mm}$

Slankheden: 
$$\lambda := \frac{c}{i_{ef,1}} \quad \lambda_E := \sqrt{\frac{E_d}{f_{y,f,d}}} \cdot \pi \quad \lambda_{rel} := \frac{\lambda}{\lambda_E}$$

$\lambda = 59 \quad \lambda_E = 76.4 \quad \lambda_{rel} = 0.78$

Knikfactoren:  $\alpha_k := 0.49 \quad \lambda_0 := 0.20 \quad \omega_{z,buc} := \omega_{buc}(\alpha_k, \lambda_{rel}, \lambda_0) \quad \omega_{z,buc} = 0.68$

Flensbuiging  $M_z$ , vereenvoudigd geldt  $factor_M := 1.5 \quad factor_F := 0.13 \cdot m$

$$\max F_y := V_{z,s,d} \cdot \frac{b_w}{h_w} \quad \max F_y = 20.00 \text{ kN}$$

$$\max M_l := V_{z,s,d} \cdot \frac{a_l}{h_w} \cdot \frac{b_w}{2} \quad \max M_l = 1.70 \text{ kN} \cdot m$$

$$M_z := factor_M \cdot \max M_l + factor_F \cdot \max F_y \quad M_z = 5.15 \text{ kN} \cdot m$$

$$\sigma := M_z \cdot \frac{6}{t_{f,1} \cdot b_{f,1}^2} \quad \sigma = 13 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

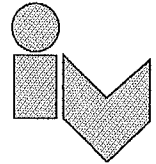
Gereduceerde toelaatbare spanning in de drukflens: 
$$f_{y,1,r} := \left( 1 - 0.4 \sqrt{\frac{\sigma}{f_{y,f,d}}} \right) \cdot f_{y,f,d} \quad f_{y,1,r} = 328 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

Capaciteit van de drukflens: 
$$N_{R,1,d} := \omega_{z,buc} \cdot b_{ef,1} \cdot t_{f,1} \cdot f_{y,1,r} \quad N_{R,1,d} = 1554 \text{ kN}$$

TOETSING VAN DE DRUKFLENS: 
$$\frac{N_{s,1,d}}{N_{R,1,d}} = 0.956 \quad \text{Toets} = \text{"VOLDOET"}$$

*cursief gedrukte functies van het rekenblad*

$$\omega_{buc}(\alpha_k, \lambda_{rel}, \lambda_0) \equiv \left[ \frac{1 + \alpha_k (\lambda_{rel} - \lambda_0) + \lambda_{rel}^2}{2 \cdot \lambda_{rel}^2} - \frac{1}{2 \cdot \lambda_{rel}^2} \sqrt{\left[ 1 + \alpha_k (\lambda_{rel} - \lambda_0) + \lambda_{rel}^2 \right]^2 - 4 \cdot \lambda_{rel}^2} \right]$$

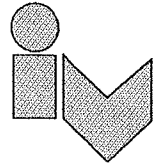


## Toetsing van het lijf op lokaal plooien

Plooicoëfficiënt	$k_{\tau} := 5.35$	
Eulerse knikspanning:	$\sigma_E := \frac{\pi^2 \cdot E_d \cdot t_w^2}{12 \cdot (1 - \nu_d^2) \cdot a_1^2}$	$\sigma_E = 105 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$
Kritieke schuifspanning:	$\tau_{i,k,l} := k_{\tau} \cdot \sigma_E$	$\tau_{i,k,l} = 562 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$
Relatieve slankheid:	$\lambda_{\text{plaat,rel}} := \sqrt{\frac{f_{y,w,d}}{\sqrt{3} \cdot \tau_{i,k,l}}}$	$\lambda_{\text{plaat,rel}} = 0.49$
Ploofactor:	$\sigma_{\text{ploo,rel}} := \sigma_{p,rel}(\lambda_{\text{plaat,rel}})$	$\sigma_{\text{ploo,rel}} = 1.00$
Ploospanning:	$\tau_{\text{ploo}} := \sigma_{\text{ploo,rel}} \cdot \frac{f_{y,w,d}}{\sqrt{3}}$	$\tau_{\text{ploo}} = 136 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$
Correctiefactor $C_{\tau}$ :	$C_{\tau} := C_{\tau}(\lambda_{\text{plaat,rel}})$	$C_{\tau} = 1$
Rekenwaarde ploospanning:	$\tau_{\text{ploo,d}} := \min\left(\frac{\tau_{\text{ploo}}}{C_{\tau}}, \frac{f_{y,w,d}}{\sqrt{3}}\right)$	$\tau_{\text{ploo,d}} = 136 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$
Capaciteit van het lijf:	$V_{R,d,l} := 0.85 \cdot \tau_{\text{ploo,d}} \cdot h_w \cdot t_w$	$V_{R,d,l} = 923 \text{ kN}$
TOETSING VAN HET LIJF:	$\frac{V_{z,s,d}}{V_{R,d,l}} = 0.542$	Toets = "VOLDOET"

*cursief gedrukte functies van het rekenblad*

$$\sigma_{p,rel}(\lambda_{p,rel}) = \begin{cases} 1.000 & \text{if } 0 \leq \lambda_{p,rel} \leq 0.7 \\ (1.474 - 0.677 \lambda_{p,rel}) & \text{if } 0.7 < \lambda_{p,rel} < 1.291 \\ \frac{1}{\lambda_{p,rel}^2} & \text{if } \lambda_{p,rel} \geq 1.291 \end{cases}$$
$$C_{\tau}(\lambda_{p,rel}) = \begin{cases} 1.000 & \text{if } 0 < \lambda_{p,rel} \leq 1.291 \\ (-0.0937 \lambda_{p,rel} + 1.1210) & \text{if } \lambda_{p,rel} > 1.291 \end{cases}$$

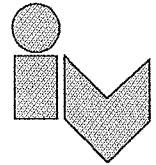


## Toetsing van het lijf op globaal plooiën

Orthotrope plaatstijfheden:	$D_x := \frac{a_1 + b_w}{a_1 + a_2} \cdot \frac{E_d \cdot t_w^3}{12}$	$D_x = 0.989 \text{ kN}\cdot\text{m}$
	$D_y := \frac{3 \cdot a_1 \cdot b_w^2 + \sqrt{2} \cdot b_w^3}{a_1 + b_w} \cdot \frac{E_d \cdot t_w^3}{12}$	$D_y = 1.117 \times 10^3 \text{ kN}\cdot\text{m}$
Kritieke schuifspanning:	$\tau_{i.k.g} := \frac{32.4}{t_w \cdot h_w^2} \cdot \sqrt[4]{D_x D_y^3}$	$\tau_{i.k.g} = 390 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$
Relatieve slankheid:	$\lambda_{\text{plaat.rel}} := \begin{cases} \frac{2 \cdot f_{y.w.d}}{\sqrt{3} \cdot \tau_{i.k.g}} & \text{if } 0.5 \leq \frac{\tau_{i.k.g}}{\tau_{i.k.l}} \leq 2.0 \\ \frac{f_{y.w.d}}{\sqrt{3} \cdot \tau_{i.k.g}} & \text{otherwise} \end{cases}$	$\lambda_{\text{plaat.rel}} = 0.83$
Plooi factor:	$\sigma_{\text{plooi.rel}} := \sigma_{p.rel}(\lambda_{\text{plaat.rel}})$	$\sigma_{\text{plooi.rel}} = 0.91$
Plooi spanning:	$\tau_{\text{plooi}} := \sigma_{\text{plooi.rel}} \cdot \frac{f_{y.w.d}}{\sqrt{3}}$	$\tau_{\text{plooi}} = 123 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$
Correctiefactor $C_\tau$ :	$C_\tau := C_\tau(\lambda_{\text{plaat.rel}})$	$C_\tau = 1$
Rekenwaarde plooi spanning:	$\tau_{\text{plooi.d}} := \min\left(\frac{\tau_{\text{plooi}}}{C_\tau}, \frac{f_{y.w.d}}{\sqrt{3}}\right)$	$\tau_{\text{plooi.d}} = 123 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$
Capaciteit van het lijf:	$V_{R.d.g} := 0.60 \tau_{\text{plooi.d}} \cdot h_w \cdot t_w$	$V_{R.d.g} = 592 \text{ kN}$
TOETSING VAN HET LIJF:	$\frac{V_{z.s.d}}{V_{R.d.g}} = 0.844$	Toets = "VOLDOET"

*cursief gedrukte functies van het rekenblad*

$$\sigma_{p.rel}(\lambda_{p.rel}) \equiv \begin{cases} 1.000 & \text{if } 0 \leq \lambda_{p.rel} \leq 0.7 \\ (1.474 - 0.677 \lambda_{p.rel}) & \text{if } 0.7 < \lambda_{p.rel} < 1.291 \\ \frac{1}{\lambda_{p.rel}^2} & \text{if } \lambda_{p.rel} \geq 1.291 \end{cases}$$
$$C_\tau(\lambda_{p.rel}) \equiv \begin{cases} 1.000 & \text{if } 0 < \lambda_{p.rel} \leq 1.291 \\ (-0.0937 \lambda_{p.rel} + 1.1210) & \text{if } \lambda_{p.rel} > 1.291 \end{cases}$$



## Vergelijking met een plaatlijgter met een vlak lijf

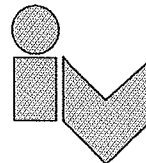
Voor de vergelijking zijn twee gevallen beschouwd.

Ten eerste is de dwarskrachtcapaciteit berekend voor een zelfde lijfdikte als het Feybec-profiel, ten tweede is de minimum benodigde dikte berekend om een gelijkwaardige sterkte te krijgen.

In beide gevallen zijn de flenzen in staat om het volledige moment over te dragen.

### Dwarskrachtcapaciteit van een vlak lijf $t = 4 \text{ mm}$

Plooiëfficiënt	$k_{\tau} := 5.35$	
Eulerse knikspanning:	$\sigma_E := \frac{\pi^2 \cdot E_d \cdot t_w^2}{12 \cdot (1 - \nu_d^2) \cdot h_w^2}$	$\sigma_E = 1 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$
Kritieke schuifspanning:	$\tau_{i.k.l} := k_{\tau} \cdot \sigma_E$	$\tau_{i.k.l} = 4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$
Relatieve slankheid:	$\lambda_{\text{plaat.rel}} := \sqrt{\frac{f_{y.w.d}}{\sqrt{3} \cdot \tau_{i.k.l}}}$	$\lambda_{\text{plaat.rel}} = 5.78$
Ploofactor:	$\sigma_{\text{plooi.rel}} := \sigma_{p.rel}(\lambda_{\text{plaat.rel}})$	$\sigma_{\text{plooi.rel}} = 0.03$
Plooispanning:	$\tau_{\text{plooi}} := \sigma_{\text{plooi.rel}} \cdot \frac{f_{y.w.d}}{\sqrt{3}}$	$\tau_{\text{plooi}} = 4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$
Correctiefactor $C_{\tau}$ :	$C_{\tau} := C_{\tau}(\lambda_{\text{plaat.rel}})$	$C_{\tau} = 0.579$
Rekenwaarde plooispanning:	$\tau_{\text{plooi.d}} := \min\left(\frac{\tau_{\text{plooi}}}{C_{\tau}}, \frac{f_{y.w.d}}{\sqrt{3}}\right)$	$\tau_{\text{plooi.d}} = 7 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$
Capaciteit van het vlakke lijf.	$V_{z.u.d} := \tau_{\text{plooi.d}} \cdot h_w \cdot t_w$	$V_{z.u.d} = 56 \text{ kN}$
Minimum capaciteit van het Feybec-profiel:	$V_{z.u.d.F} := \min(V_{R.d.l}, V_{R.d.g})$	$V_{z.u.d.F} = 592 \text{ kN}$
VERGELIJKING:	$\frac{V_{z.u.d.F}}{V_{z.u.d}} = 10.6$	



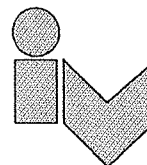
### Minimum benodigde dikte van een vlak lijf

Minimum lijfdikte:	$t_{w.min} := 10.2 \text{ mm}$	
Plooicoëfficiënt	$k_{\tau} := 5.35$	
Eulerse knikspanning:	$\sigma_E := \frac{\pi^2 \cdot E_d \cdot t_{w.min}^2}{12 \cdot (1 - \nu_d^2) \cdot h_w^2}$	$\sigma_E = 5 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$
Kritieke schuifspanning:	$\tau_{i.k.l} := k_{\tau} \cdot \sigma_E$	$\tau_{i.k.l} = 26 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$
Relatieve slankheid:	$\lambda_{\text{plaat.rel}} := \sqrt{\frac{f_{y.w.d}}{\sqrt{3} \cdot \tau_{i.k.l}}}$	$\lambda_{\text{plaat.rel}} = 2.27$
Ploofactor:	$\sigma_{\text{ploo.rel}} := \sigma_{p.rel}(\lambda_{\text{plaat.rel}})$	$\sigma_{\text{ploo.rel}} = 0.19$
Ploospanning:	$\tau_{\text{ploo}} := \sigma_{\text{ploo.rel}} \cdot \frac{f_{y.w.d}}{\sqrt{3}}$	$\tau_{\text{ploo}} = 26 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$
Correctiefactor $C_{\tau}$ :	$C_{\tau} := C_{\tau}(\lambda_{\text{plaat.rel}})$	$C_{\tau} = 0.909$
Rekenwaarde ploospanning:	$\tau_{\text{ploo.d}} := \min\left(\frac{\tau_{\text{ploo}}}{C_{\tau}}, \frac{f_{y.w.d}}{\sqrt{3}}\right)$	$\tau_{\text{ploo.d}} = 29 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$
Capaciteit van het vlakke lijf:	$V_{z.u.d} := \tau_{\text{ploo.d}} \cdot h_w \cdot t_{w.min}$	$V_{z.u.d} = 593 \text{ kN}$
Minimum capaciteit van het Feybec-profiel:	$V_{z.u.d.F} := \min(V_{R.d.l}, V_{R.d.g})$	$V_{z.u.d.F} = 592 \text{ kN}$

### Conclusie:

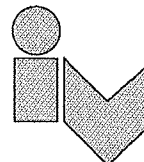
De dwarskrachtcapaciteit van een vlak lijf met dezelfde dikte is slechts eentiende van het Feybec-profiel.

Voor een vlak lijf met een gelijkwaardige sterkte als het Feybec-profiel moet een twee en eenhalf keer zo grote dikte worden toegepast.

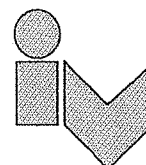


**BIJLAGE A**

**Literatuuroverzicht**

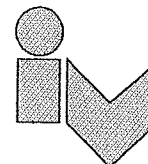


<b>Bron/Auteur</b>	<b>Omschrijving</b>
DAST-Ri 015	Träger mit schlanken Stegen, 1990
StBK N5	Swedish Code for Light-Gauge Metal Structures, 1982, Stockholm, Swedish Institute for Steel Construction
Apikian, K.:	Berechnung der Querbiegemomente an Gurten von I-Trägern mit trapezförmig profilierten Stegen nach statischen Methoden. Diplom-Arbeit, Technische Universität Berlin, Fachgebiet Stahlbau, Berlin 1990, nicht veröffentlicht
Aschinger, R.:	Tragverhalten van geschweißten I-Trägern mit trapezförmig profilierten Stegen bei Torsion, Biegung, Biegedrillknicken und Normalkraft, Verlag Shaker, 1994
Aschinger, R., Beljaev, V.F., Mikhailova, T.V.:	Zur Querkrafttragfähigkeit van I-Trägern mit verschiedenen Stegprofilierungen. Stahlbau 60 (1991), S. 314- 317.
Baehre, R., Wolfram, R.:	Zur Schubfeldberechnung van Trapezprofilen. Stahlbau 6/1986, S. 175 - 179.
Bergfelt, A., Edlund, B., Leiva-Aravena, L.:	Trapezoidally Corrugated Girder Webs. Ingenieurs et Architectes Suisses, No. 1-2, Januar 1985, S. 22-27.
Bergfelt, A., Leiva-Aravena, L.:	Shear buckling of trapezoidally corrugated girder webs, Report Part 2, Chalmers University of Technology, Göteborg, 1984
Bergfelt, A., Leiva-Aravena, L.:	Trapezoidally corrugated girder webs, Ingenieurs et Architectes Swisses, 1985, S. 22-26
Bergfelt, A., Leiva-Aravena, L.:	Buckling of trapezoidally corrugated webs and panels, IABSE-Colloquium, Stockholm, 1986
El-Kersh, J. H.:	Post Buckling Behaviour of Trapezoidally Corrugated Thin Web Plates. Dissertation, Suez Canal University, 1991.
Gachon, H., Zoratti, J.-C.:	Panneaux à ame mince plissée comportement et résistance à des farces de cisaillement, Ingenieurs et Architectes Swisses, 1985, No. 1-2

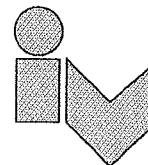


<b>Bron/Auteur</b>	<b>Omschrijving</b>
Großberndt, H., Kniese, A.:	Untersuchung über Querkraft- u. Zugkraftbeanspruchungen sowie Folgerungen über kombinierte Beanspruchungen van Schraubenverbindungen bei Stahlprofilblech-Konstruktionen
Harrison, J. D.:	Exploratory Fatigue Tests of Two Girders with Corrugated Webs. B.W.R.A. Report, British Welding Journal, March 1965.
Herzog, M.:	Leichtträger mit Faltensteg, Stahlbau 57 (1988), S. 246-249
Ivanyi, M., Quang, H. V.:	Tests on Beams with Corrugated Web. Stability of Steel Structures Budapest, Hungary, 1990, XV. Special Problems Discussion
Kähönen, A.:	About the Calculation Procedure of Steel I-Beams with Corrugated Webs. Diploma Work, Lappeenranta, University of Technology, 1983 (in Finish).
Kähönen, A.:	Zur Einleitung van Einzellasten in 1- Träger mit trapezförmig profilierten Stegen. Stahlbau 57 (1988), S. 250-252
Kliemann, H.:	Ermittlung der Spannungsverteilung in den Gurten van I-Trägern mit trapezförmig profilierten Stegen. Diplom-Arbeit, Technische Universität Berlin, Fachgebiet Stahlbau, Berlin 1993, nicht veröffentlicht.
Korashy, M., Varga, J.:	Comparative Investigation of Fatigue Strength of Beams with Web Plate Stiffened in the Traditional Way and by Corrugation. Acta Technica Academiae Scientiarum Hungaricae, Tomus 89 (3-4), pp. 309-346 (1979).
Leiva, L.:	Skjuvbuckling hos Plåtbalkar med Trapetsprofilerat Liv. Delrapport 1, Chalmers University of Technology, Sweden, Department of Structural Engineering, Division of Steel and Timber Structures, Publ. S 83:3, Göteborg 1983 (in Swedish).
Leiva-Aravena, L.:	Trapezoidally Corrugated Panels, Buckling Behaviour under Axial Compression and Shear. Chalmers University of Technology, Sweden, Department of Structural Engineering, Division of Steel and Timber Structures, Publ. S 87: 1, Göteborg 1987.
Lindner, J., Aschinger, R.:	Grenzs Schubtragfähigkeit van I-Trägern mit trapezförmig profilierten Stegen, Stahlbau 57 (1988), S. 377-380
Lindner, J., Aschinger, R.:	Zur Torsionsteifigkeit von Trapezstegträgern, Stahlbau 59 (1990), S. 113-120

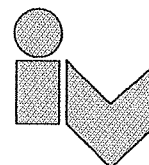




<b>Bron/Auteur</b>	<b>Omschrijving</b>
Lindner, J., Aschinger, R.:	Grenzscherbtragfähigkeit van I-Trägern mit trapezförmig profilierten Stegen. Stahlbau 57 (1988), S. 377-380
Lindner, J., Aschinger, R.:	Biegetragfähigkeit van I-Trägern mit trapezförmig profilierten Stegen. Schlußbericht des DFG-Forschungsvorhabens Li 351/3-2, Bericht VR 2087 des Instituts für Baukonstruktionen und Festigkeit der Technischen Universität Berlin, Berlin 1988.
Lindner, J., Aschinger, R.:	Gul-tspannungen infolge van Biegung und Biegedrillknicken bei I-Trägern mit trapezförmig profilierten Stegen. Bericht Nr. 2113 des Instituts für Baukonstruktionen und Festigkeit der Technischen Universität Berlin, Berlin 1993
Lindner, J., Aschinger, R.:	Zur Querkrafttragfähigkeit van I-Trägern mit verschiedenen Stegprofilierungen. Bericht Nr. 2114 des Instituts für Baukonstruktionen und Festigkeit der Technischen Universität Berlin, Berlin 1991
Lindner, J., Aschinger, R.:	Ergänzende Auswertungen zur Interaktion zwischen Biegedrillknicken und örtlichem Beulen. Stahlbau 61 (1992), S. 188-191.
Lindner, J., Aschinger, R.:	Buckling and Local Plate Buckling. Journal of Constructional Steel Research 31 (1994), S. 267-287.
Lindner J., Huang B.:	Tragfähigkeit van Trapezstegträgern mit Ausschnitten, Zwischenbericht zum DFG Forschungsvorhaben Li 351/8-1, Berlin, 1991
Lindner J., Huang B.:	Tragfähigkeit van Trapezstegträgern mit Ausschnitten, Endbericht zum DFG Forschungsvorhaben Li 351/8, Berlin, 1994
Lindner J., Huang B.:	Beulwerte für trapezförmig profilierte Bleche unter Schubbeanspruchung, Stahlbau 64 (1995), Heft 12, S. 370-374
Lindner J., Huang B.:	Trapezstegträger mit Ausschnitten. Schlußbericht des DFG-Forschungsvorhabens Li 351/8-2, Bericht VR 2105 des Instituts für Baukonstruktionen und Festigkeit der Technischen Universität Berlin, Berlin 1993.
Lindner, J.:	Zur Bemessung van Trapezstegträgern. Stahlbau 61 (1992), S. 311-318.
Lindner, J., Gregull, T.:	Zur Traglast van Biegeträgern, die durch gleichzeitiges Auftreten von örtlichem Beulen und Biegedrillknicken versagen. Stahlbau 61 (1992), S. 9-15.



<b>Bron/Auteur</b>	<b>Omschrijving</b>
Lindner, J., Schütte, C.:	Trapezstegträger-Gurte. Schlußbericht des DFG Forschungsvorhabens Li 351/7-1, Bericht VR 2106 des Instituts für Baukonstruktionen und Festigkeit der Technischen Universität Berlin, Berlin 1993.
Luo, R., Edlund, B.:	Buckling Analysis of Trapezoidally Corrugated Panels Using Spline Finite Strip Method. Thin- Walled Structures 18, 1994, pp. 209-224.
Roik, K., Carl, J., Lindner, J.:	Biegetorsionsprobleme gerader dünnwandiger Stäbe. Verlag Ernst & Sohn, Berlin, München, Düsseldorf, 1972
Sandhi, M.:	Untersuchung des Verzweigungsproblems an Gurten von Trapezstegträgern nach der Differenzenmethode. Diplom-Arbeit, Technische Universität Berlin, Fachgebiet Stahlbau, Berlin 1992, nicht veröffentlicht
Scheer, J., Maier, W., Plumeyer, K.:	Versuche an Trägern mit Trapezblechstegen, Bericht Nr. 8127, Institut für Stahlbau der TU Braunschweig, 1984
Scheer, J., Pasternak, H., Plumeyer, K., Ruga, J., Einsiedler, O.:	Trapezstegträger geschweißt, Endbericht Nr. 6203/2, Institut für Stahlbau, TU Braunschweig, 1993
Scheer, J.:	Versuche an Trägern mit Trapezblechstegen. Bericht Nr. 8127, Technische Universität Braunschweig, Institut für Stahlbau, 1984.
Scheer, J.:	Großversuch mit Hallenrahmen aus Trapezblechträgern. Bericht Nr. 8144, Technische Universität Braunschweig, Institut für Stahlbau, 1985
Scheer, J.:	Trapezstegträger geschweißt. Zwischenbericht Nr. 6203/1, Technische Universität Braunschweig, Institut für Stahlbau, 1992.
Scheer, J.:	Trapezstegträger geschweißt. Zwischenbericht Nr. 6203/2, Technische Universität Braunschweig, Institut für Stahlbau, 1992.
Schütte, C.:	Berechnung der Querbiegemomente an Gurten von I-Trägern mit trapezförmig profilierten Stegen nach der Methode der finiten Elemente. Diplom-Arbeit, Technische Universität Berlin, Fachgebiet Stahlbau, Berlin 1990, nicht veröffentlicht
Sherman, D., Fisher, J.:	Bearns with Corrugated Webs. Proceedings of First Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, Department of Civil Engineering, Continuing Education Series, University of Missouri-Rolla, 1971.

**Bron/Auteur****Omschrijving**

Simula, S., Jonsson, K.: .

Skjuvbuckling av Balk med Trapetsprofilerat Liv Chalmers University of Technology, Sweden, Department of Structural Engineering, Division of Steel and Timber Structures, Publ. S 84: 16, Göteborg 1984

Teräs, E., Kouhi, J.:

Report No. RAT3846. Technical Research Centre of Finland, Espoo, 1983 (in Finnish).