

## Kniklengtefactoren buisprofielen in gelaste vakwerken

**Citation for published version (APA):**

Boel, H. D., Snijder, H. H., Hoenderkamp, J. C. D., & Spoorenberg, R. C. (2012). Kniklengtefactoren buisprofielen in gelaste vakwerken. *Bouwen met Staal*, 230(12), 44-49.

**Document status and date:**

Gepubliceerd: 01/01/2012

**Document Version:**

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

**Please check the document version of this publication:**

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

**General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

[www.tue.nl/taverne](http://www.tue.nl/taverne)

**Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

[openaccess@tue.nl](mailto:openaccess@tue.nl)

providing details and we will investigate your claim.

Dit artikel is gebaseerd op een uitgebreid wetenschappelijk document dat is op te halen van [www.bouwenmetstaal.nl](http://www.bouwenmetstaal.nl) onder vakblad – wetenschappelijke artikelen.

# Kniklengtefactoren buisprofielen in gelaste vakwerken

**Gelaste verbindingen tussen buisvormige wand- en randstaven in een vakwerk kunnen een zekere mate van buigend moment overdragen en bezitten een eindige stijfheid. Dit beïnvloedt de kniklengtes van rand- en wandstaven. Bestaande formules voor kniklengtefactoren zijn over het algemeen conservatief, soms niet. Een voorstel voor formules om kniklengtefactoren te bepalen, en vervolgonderzoek.**

ir. H.D. Boel, prof.ir. H.H. Snijder, dr.ir. J.C.D. Hoenderkamp en dr.ir. R.C. Spoorenberg

Harm Boel is constructeur bij Bartels Ingenieursbureau in Apeldoorn. Roel Spoorenberg is (gast)onderzoeker bij de Technische Universiteit Eindhoven en structural engineer bij Iv-Consult in Papendrecht. Bert Snijder is hoogleraar Constructief Ontwerpen (staal) en Hans Hoenderkamp is universitair hoofddocent Constructief Ontwerpen (staal), beiden aan de Technische Universiteit Eindhoven, faculteit Bouwkunde.

Eurocode 3 geeft kniklengtefactoren voor staven in vakwerken. Voor buisprofielen in gelaste vakwerken geldt  $K = 0,75$  voor wandstaven en  $K = 0,9$  voor randstaven.  $K$  is de kniklengtefactor: de kniklengte gedeeld door de systeemplengte.  $K = 0,75$  voor wandstaven geldt ongeacht de waarde van de verbindingsparameter  $\beta$ , die hieronder staat gedefinieerd voor T-, Y-, en X-verbindingen en voor K- en N-verbindingen met twee identieke wandstaven. Voor rechthoekige of vierkante buisprofielen geldt:

$$\beta = \frac{b_1}{b_0} \quad (1a)$$

Voor ronde buisprofielen:

$$\beta = \frac{d_1}{d_0} \quad (1b)$$

Waarin, voor een rechthoekig buisprofiel (RHS) of een vierkante (SHS):  
 $b_1$  breedte van de wandstaaf  
 $b_0$  breedte van de randstaaf

En voor een rond buisprofiel (CHS):

$d_1$  diameter van de wandstaaf  
 $d_0$  diameter van de randstaaf

In eerdere versies van Eurocode 3 mocht  $K = 0,75$  voor wandstaven uitsluitend worden toegepast bij  $\beta \leq 0,6$ . Volgens de oude norm NEN 6771 was die eis anders: voor RHS en SHS gold  $\beta \geq 0,6$  en voor CHS  $\beta \geq 0,5$ . Daarnaast ligt het voor de hand dat ook de verbindingsparameter  $\gamma$  van invloed is op de verbindingsstijfheid en daarmee op de kniklengtefactoren.

Voor rechthoekige of vierkante buisprofielen:

$$\gamma = \frac{b_0}{2t_0} \quad (2a)$$

Voor ronde buisprofielen:

$$\gamma = \frac{d_0}{2t_0} \quad (2b)$$

Waarin:  
 $t_0$  wanddikte van de randstaaf

De invloed van  $\beta$  en  $\gamma$  is onderzocht met lineaire Eulerse knikberekeningen (ANSYS 11.0). Daarbij wordt zowel knik in- als uit-het-vlak van het vakwerk beschouwd. Met een lineaire knikberekening (= linear buckling analysis = LBA) worden de knikvorm en

de kritieke elastische kracht van het vakwerk bepaald om de kniklengte van rand- en wandstaven vast te leggen.

## Literatuuroverzicht

CIDECT<sup>[2]</sup> geeft ook formules voor de kniklengtefactor van wandstaven. Formule (3) wordt bijvoorbeeld gebruikt om kniklengtefactoren van SHS-wandstaven verbonden aan SHS-randstaven te berekenen voor knik in- en uit-het-vlak.

$$\text{voor } \beta < 0,6 \quad K = 2,3 \left( \frac{b_1^2}{L_1 b_0} \right)^{0,25} \quad (3)$$

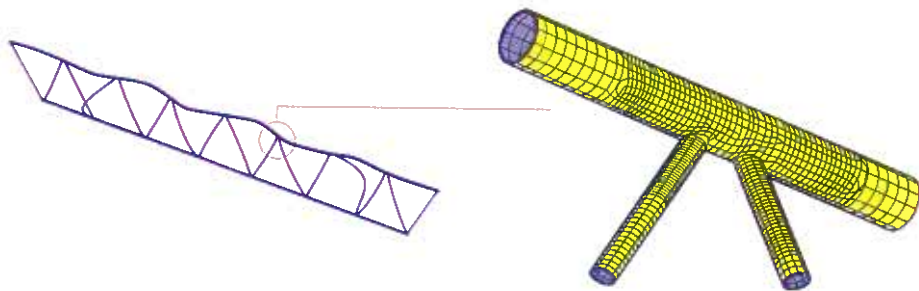
Waarin:

$L_1$  systeemplengte van de wandstaaf

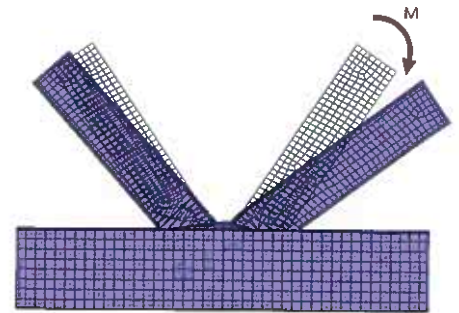
Vergelijkbare formules met andere coëfficiënten worden gegeven in [2] voor CHS-wandstaven verbonden aan SHS- en CHS-randstaven. Eerder onderzoek naar kniklengtes is gepresenteerd in [3-5]. Later onderzoek<sup>[6]</sup> laat zien dat een kniklengtefactor van  $K = 0,75$  voor wandstaven, bij knik uit-het-vlak van het vakwerk, vaak conservatief is, soms onconservatief.

De invloed van  $\beta$  op de kniklengtefactor is numeriek onderzocht<sup>[7]</sup> met LBA. Hierbij zijn W-vormige vakwerken (type Warren) gemodelleerd met schaalementen (afb. 1). Door de randstaafafmeting constant te houden (SHS- of CHS 200/6,3) en te variëren in wandstaafafmeting (SHS- of CHS 50/6,3, 100/6,3, 150/6,3 en 200/6,3) is de invloed van  $\beta$  onderzocht.

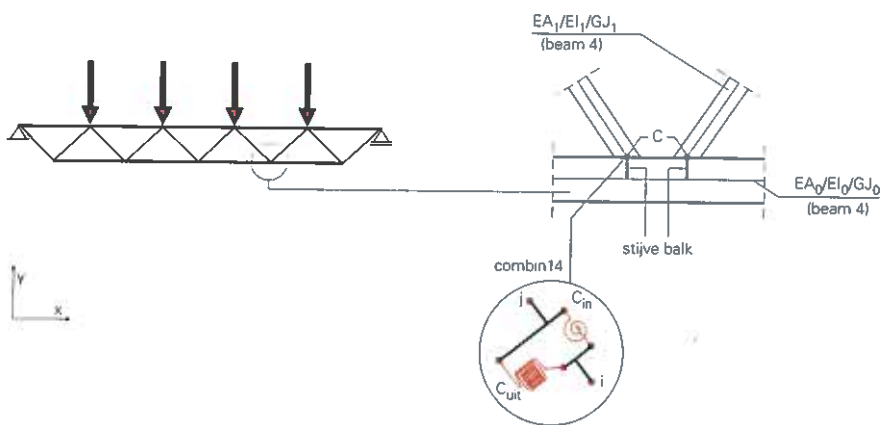
Hieruit bleek dat  $\beta$  een significante invloed heeft op de kniklengtefactor van zowel rand- als wandstaven en dat de regelgeving (Eurocode/NEN) en de formules van CIDECT over het algemeen geen correcte waarde geven van de kniklengtefactor<sup>[7]</sup>.



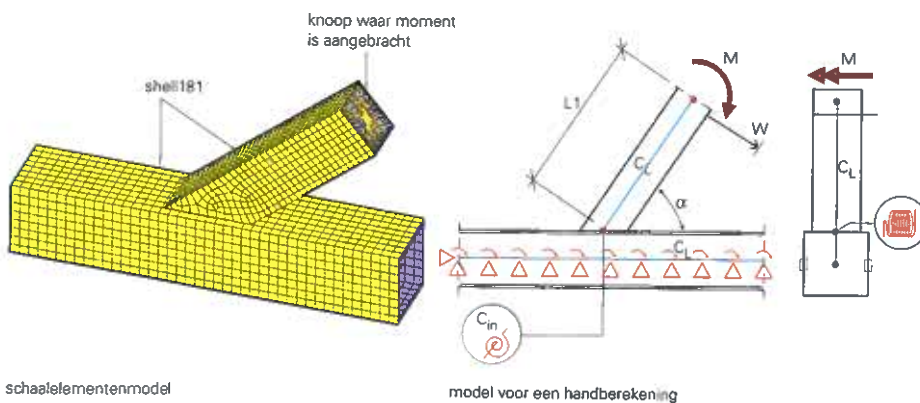
1. Model van een W-vormig vakwerk opgebouwd uit schaalementen<sup>1)</sup>.



4. Vervorming van de verbinding door een moment op de rechter wandstaaf.



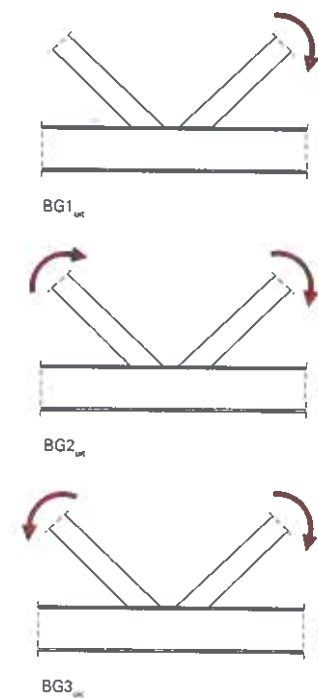
2. Eindig-elementenmodel van balkelementen voor wand- en randstaven en rotatieveren voor de verbindingen.



schaalementenmodel

model voor een handberekening

3. Berekeningsmodellen voor de rotatieveerijfheid van de verbinding in-het-vlak van het vakwerk.



5. Belastinggevallen om de rotatieveerijfheid in-het-vlak ( $C_{in}$ ) te bepalen.

## Methode

De kniklengtefactor wordt bepaald met een lineaire knikberekening. Wanneer het model van het vakwerk volledig uit schaalementen wordt opgebouwd als in [7] is het niet mogelijk de invloeden van  $\beta$  en  $\gamma$  op de verbindingstijfheid en de invloed van de verbindingstijfheid op de kniklengte afzonderlijk te onderzoeken. Bij een schaalementenmodel (afb. 1) wordt namelijk de kniklengtefactor rechtstreeks uit het knikgedrag afgeleid zonder de verbindingstijfheid apart te bepalen. Daarnaast zijn de resultaten slechts te verkrijgen door foutgevoelige handmatige post-processing indien een model met schaalementen wordt gebruikt en vergt zo'n model relatief veel rekentijd. Om deze redenen is besloten de rand- en wandstaven te modelleren met balkelementen (BEAM 4) en de buisverbindingen met elastische rotatieveren (COMBIN 14), zie afbeelding 2. De rotatieveerstijfheden van de buisverbindingen zijn bepaald door de verbinding apart te modelleren met schaalementen (SHELL 181) en door de verplaatsingen – berekend met dit schaalementenmodel – te vergelijken met die volgens een handberekening. De zo verkregen verbindingstijfheden zijn toegekend aan de rotatieveren in het balkelementenmodel van het vakwerk waarmee vervolgens een parameteronderzoek is uitgevoerd voor diverse configuraties van rand- en wandstaven in een W-vormig vakwerk. Voor elke configuratie wordt eerst een eerste-orde elastische (= linear elastic analysis = LA) berekening uitgevoerd om de normaalkracht in de diverse rand- en wandstaven te bepalen. Vervolgens is een lineaire knikberekening uitgevoerd waarmee de knikvorm en de kritieke elastische factor  $\alpha_{cr}$  van het vakwerk zijn bepaald. Dit is de factor waarmee de rekenwaarden van de belastingen moeten worden vermenigvuldigd om elastische instabiliteit te veroorzaken. Een kniklengte is toegekend aan de staaf in het vakwerk die knik vertoonde. Dit vereist een kwalitatieve beoordeling van de knikvorm. Door de kritieke elastische factor  $\alpha_{cr}$  behorend bij die knikvorm te vermenigvuldigen met de normaalkracht  $N$  en het resultaat gelijk te stellen aan de Eulerse knikformule kan de kniklengte  $L_{cr}$  worden berekend:

$$L_{cr} = \sqrt{\frac{\pi^2 EI}{\alpha_{cr} N}} \quad (4)$$

Hierin is  $EI$  de buigstijfheid van de staaf corresponderend met de richting van de knikvorm (in- of uit-het-vlak). De bijbehorende kniklengtefactor  $K$  kan nu als volgt worden berekend:

$$K = \frac{L_{cr}}{L} = \sqrt{\frac{\pi^2 EI}{\alpha_{cr} NL^2}} \quad (5)$$

$L$  de systeemplengte van de staaf, die later nader wordt gedefinieerd

### Bepalen rotatieveerstijfheid

Voor de lineaire knikberekeningen moeten de rotatieveerstijfheden van de verbindingen worden bepaald. Het betreft verbindingen met een tussenruimte (Engels: gap = gapping), zie afbeelding 2. De rotatieveerstijfheid van de verbinding is in het balkelementenmodel geïmplementeerd door de knopen  $i$  en  $j$ , met dezelfde coördinaten, te verbinden via rotatieveren. Deze knopen zijn gesitueerd op de plek waar de systeemlijn van de wandstaaf de wand van de randstaaf snijdt (C in afb. 2). De excentriciteit tussen de systeemlijn van de randstaaf en punt C is gemodelleerd met een oneindig stijf balkelement. Theoretisch moeten zes verbindingstijfheden worden aangebracht tussen de knopen  $i$  en  $j$ : drie translatie- en drie rotatieveerstijfheden. De translatieveerstijfheden in  $x$ - en  $z$ -richting zijn voor 100% stijf aangenomen. Uit oriënterende berekeningen blijkt dat de translatieveerstijfheid in  $y$ -richting (in de richting van de wandstaaf) en de rotatieveerstijfheid om de lengteas van de wandstaaf de resultaten van een LBA niet beïnvloeden. Om een correcte LBA uit te voeren moeten dus twee verbindingstijfheden worden gemodelleerd: de rotatieveerstijfheid  $C_{in}$  representeert de verbindingstijfheid in-het-vlak om de  $z$ -as en de rotatieveerstijfheid  $C_{uit}$  representeert de verbindingstijfheid uit-het-vlak om de  $x$ -as van de wandstaaf. De waarden van de rotatieveerstijfheden worden bepaald door verplaatsingen van de wand-

staven verkregen met een schaalementenmodel van de verbinding te vergelijken met die uit een relatief eenvoudige handberekening. Dit wordt in afbeelding 3 geïllustreerd voor de rotatieveerstijfheid in-het-vlak  $C_{in}$ , waarbij de randstaaf volledig is gefixeerd. Zowel in het schaalementenmodel als in het model voor de handberekening wordt aan het uiteinde van de wandstaaf een moment aangebracht die een verplaatsing  $w$  van het aangrijpingspunt van het moment veroorzaakt. Met het schaalementenmodel wordt de verplaatsing  $w_{cem}$  bepaald; met het model voor de handberekening de verplaatsing  $w_h$  die is opgebouwd uit twee componenten: een bijdrage van het meeveren van de verbinding en een door het buigen van de wandstaaf:

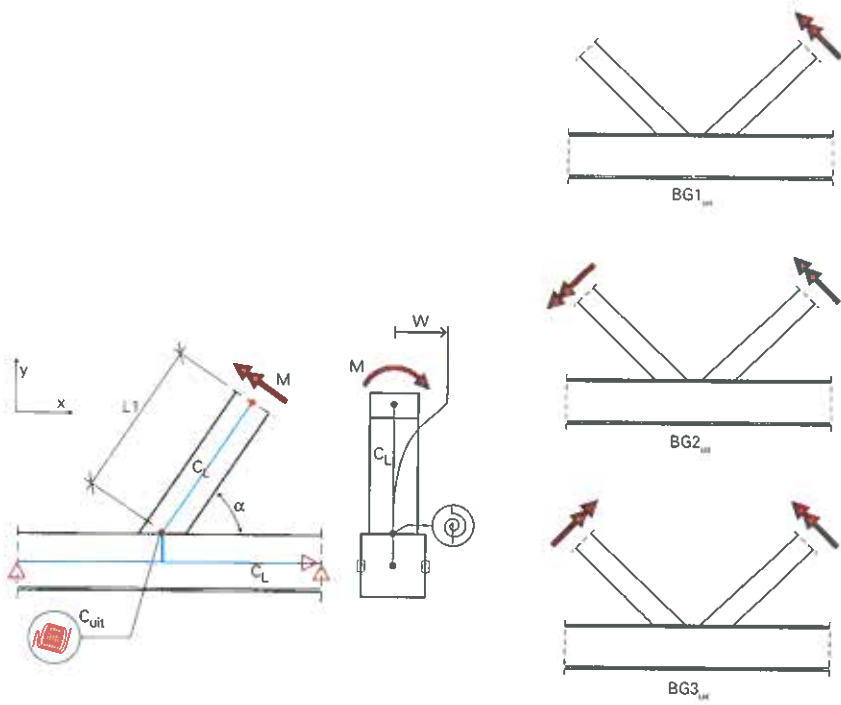
$$w_h = \frac{ML_1}{C_{in}} + \frac{ML_1^2}{2EI_1} \quad (6)$$

Hierin is  $EI_1$  de buigstijfheid van de wandstaaf. Door nu de verplaatsing berekend met de eindig-elementenmethode gelijk te stellen aan die volgens de handberekening kan de rotatieveerstijfheid in-het-vlak worden bepaald:

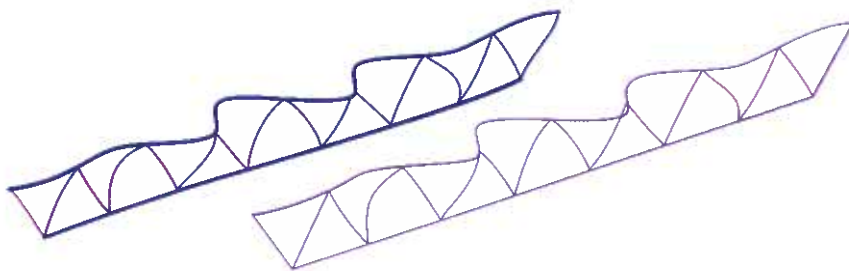
$$w_h = w_{cem} = \frac{ML_1}{C_{in}} + \frac{ML_1^2}{2EI_1} \quad (7)$$

$$C_{in} = \frac{2ML_1EI_1}{2EI_1w_{cem} - ML_1^2} \quad (8)$$

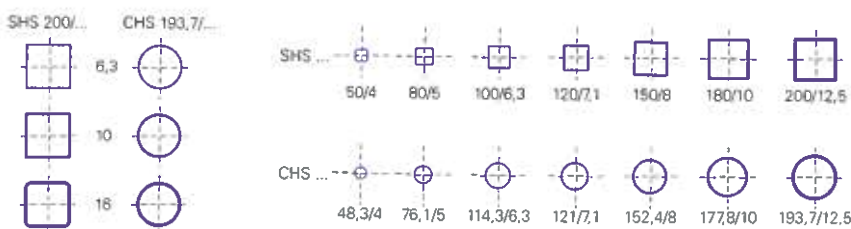
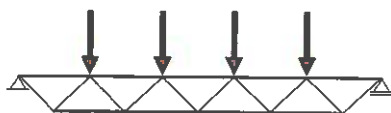
In het vakwerk van afbeelding 2 sluiten telkens twee wandstaven op een randstaaf aan bij de verbindingen, behalve bij de uiteinden van het vakwerk. Door een tweede wandstaaf toe te voegen wordt de verbindingstijfheid afhankelijk van het belastinggeval. Immers, een moment in de ene wandstaaf veroorzaakt een verplaatsing van het uiteinde van de andere wandstaaf door het vervormen van de wand van de randstaaf (afb. 4). Om deze reden zijn drie belastinggevallen aangebracht waarmee drie verschillende waarden voor de verbindingstijfheid  $C_{in}$  zijn bepaald (afb. 5).



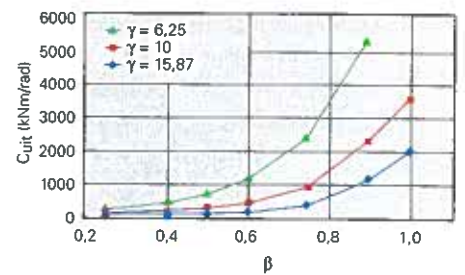
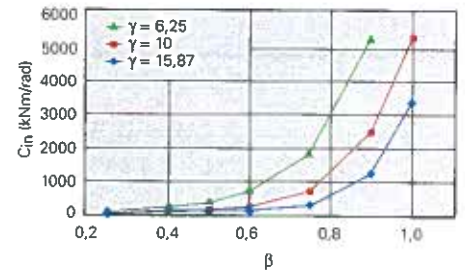
6. Berekeningsmodel en belastinggevallen voor de rotatieveerijfheid van de verbinding uit-het-vlak van het vakwerk.



7. Vergelijking van knikvormen verkregen met een schaal- (links) en een balkelamenteenmodel (rechts).



8. Onderzochte vakwerkgeometrie en toegepaste profieldoorsneden.



9. Rotatieveerijfheden in-het-vlak  $C_m$  (boven) en uit-het-vlak  $C_{uit}$  (onder) als functie van de verbindingsparameter  $\beta$  voor verschillende waarden van de verbindingsparameter  $\gamma$ , SHS-SHS-verbindingen met tussenruimte.



knik van de wandstaaf in-het-vlak van het vakwerk (zijaanzicht)



knik van de randstaaf in-het-vlak van het vakwerk (zijaanzicht)



knik van de wandstaaf uit-het-vlak van het vakwerk (bovenaanzicht)



knik van de randstaaf uit-het-vlak van het vakwerk (bovenaanzicht)

10. Knikvormen verkregen met het balkelamenteenmodel voor een vakwerk met wandstaven SHS 100/6,3 en randstaven SHS 200/6,3.

**Literatuur** 1. H.H. Snijder, H.D. Boel, J.C. D. Hoenderkamp en R.C. Spoorberg, 'Buckling length factors for welded lattice girders with hollow section braces and chords', *Eurosteel 2011 – 6th European Conference on Steel and Composite Structures, ECCS, Brussels (B) 2011*, p. 1881-1886. • 2. J. Rondal, K-G Würker, D. Dutta, J. Wardenier, en N. Yeomans, *Structural Stability of Hollow Sections*, CIDECT, Köln (D) 1992. • 3. J. Mouty, *Effective Lengths of Lattice Girder Members*, CIDECT, Köln (D) 1980. • 4. J.P. Grimault, *Buckling Length of Hollow Section Web Members Welded To Hollow Section Chords (Report 3E-80E)*, CIDECT, Köln (D) 1980. • 5. J. Rondal, *Effective Lengths of Tubular Lattice Girder Members – Statical Tests (Report 3K-88/9)*, CIDECT, Köln (D) 1988.

Voor de rotatieveerijfheid van de verbinding uit-het-vlak van het vakwerk is een vergelijkbare methode gebruikt met het verschil dat in het model van de verbinding de translatie en rotatie van de randstaaf alleen zijn verhinderd aan de uiteinden (afb. 6). Dit zorgt voor complexere formules om de rotatieveerijfheid van de verbinding uit-het-vlak  $C_{uit}$  te berekenen<sup>[6]</sup>.

Door knikvormen en kritieke elastische factoren uit het balkelementenmodel te vergelijken met die uit een schaalementenmodel (afb. 7) is vastgesteld met welk belastinggeval de rotatieveerijfheid van de verbinding in het balkelementenmodel van afbeelding 2 moet worden bepaald. Een goede overeenkomst tussen de resultaten vanuit beide modellen is bepalend voor de te gebruiken belastinggevallen. Uit de vergelijkingen bleek dat de rotatieveerijfheid van de verbinding in-het-vlak van het vakwerk moet worden bepaald met belastinggeval  $BG1_{in}$  (afb. 5). De rotatieveerijfheid van de verbinding uit-het-vlak van het vakwerk moet daarentegen worden bepaald als gemiddelde waarde van de rotatieveerijfheden berekend voor de belastinggevallen  $BG1_{uit}$ ,  $BG2_{uit}$  en  $BG3_{uit}$  (afb. 6).

### Parameteronderzoek

Om de invloed van  $\beta$  en  $\gamma$  op de kniklengtefactor te bepalen zijn lineaire knikberekeningen uitgevoerd voor een realistische W-vormige vakwerkgeometrie, opgelegd op een scharnier en een rol (afb. 2). Hierbij zijn gangbare profieldoorsneden gebruikt en is gevarieerd in wandstaafafmeting en in de wanddiktes van de randstaven. Alle randstaven hebben dezelfde doorsnede, net als de wandstaven. De bovenste randstaaf is bij elke verbinding – waar ook een verticale geconcentreerde last is aangebracht –

gesteund tegen verplaatsing uit-het-vlak.

De toegepaste combinaties van wand- en randstaven zijn als volgt (afb. 8).

- SHS wandstaven gelast aan SHS randstaven met  $\beta = 0,25; 0,40; 0,50; 0,60; 0,75; 0,90$  en  $1,00$  en  $\gamma = 6,25; 10,00$  en  $15,87$  met uitzondering van de combinatie waarvoor geldt  $\gamma = 6,25$  en  $\beta = 1,00$  in verband met een geometriefout bij het modelleren van de verbinding.

- CHS wandstaven gelast aan SHS randstaven met  $\beta = 0,24; 0,38; 0,57; 0,61; 0,76; 0,89$  en  $0,97$  en  $\gamma = 6,25; 10,00$  en  $15,87$ .

- CHS wandstaven gelast aan CHS randstaven met  $\beta = 0,25; 0,39; 0,59; 0,62; 0,79; 0,92$  en  $1,00$  en  $\gamma = 6,05; 9,69$  en  $15,37$ .

De verbindingen hebben een ruimte  $g$  tussen de wandstaven. De minimale tussenruimte volgens NEN-EN 1993-1-8 is gehanteerd:  $g = 2t_1$ , waarin  $t_1$  de wanddikte van de wandstaaf is. Er is niet gevarieerd in tussenruimte omdat is gebleken dat de invloed hiervan op de kritieke elastische kracht verwaarloosbaar klein is voor relatief kleine tussenruimtes.

### Invloed $\beta$ en $\gamma$ op rotatieveerijfheid

Als een typisch voorbeeld van de invloed van de verbindingparameters  $\beta$  en  $\gamma$  op de rotatieveerijfheid van een buisverbinding worden de resultaten weergegeven voor de combinatie van SHS-wandstaven gelast aan SHS 200-randstaven. In afbeelding 9 wordt de invloed getoond van  $\beta$  en  $\gamma$  op de rotatieveerijfheid in-het-vlak  $C_{in}$  (waarde verkregen voor  $BG1_{in}$ , afb. 5) en op de rotatieveerijfheid uit-het-vlak stijfheid  $C_{uit}$  (gemiddelde van de waarden verkregen voor  $BG1_{uit}$ ,  $BG2_{uit}$  en  $BG3_{uit}$ , afb. 6). Het is te zien dat bij een toename van  $\beta$  de rotatieveerijfheid van de verbinding bij benadering exponentieel toeneemt. Dit is te verklaren door-

dat de krachtsoverdracht tussen de wand- en randstaaf directer is: de wand van de randstaaf wordt minder op buiging belast. Een toename van  $\gamma$  (afname van de wanddikte van de randstaaf) betekent een afname van de verbindingstijfheid. Een kleinere wanddikte van de randstaaf geeft een kleinere stijfheid van de wand van de randstaaf en heeft dus een nadelig effect op de rotatieveerijfheid van de verbinding. De berekende rotatieveerijfheden van de verbindingen zijn toegepast in het balkelementenmodel van afbeelding 2.

### Invloed $\beta$ en $\gamma$ op kniklengtefactoren

Afbeelding 10 laat de vier relevante knikvormen zien voor SHS 100/6,3-wandstaven in combinatie met SHS 200/6,3-randstaven. Met de knikberekeningen zijn kniklengtefactoren berekend via formule (5). Daarbij is de systeemplengte gedefinieerd als de afstand tussen de snijpunten van de systeemlijn van de wandstaaf met de wand van de randstaaf (afb. 11).

In afbeelding 12 worden de kniklengtefactoren getoond die zijn verkregen door LBA voor knik in-het-vlak van SHS-rand- en SHS-wandstaven (doorgetrokken lijnen). Soortgelijke resultaten zijn verkregen voor kniklengtefactoren voor knik uit-het-vlak en voor CHS-wandstaven gelast aan SHS- en CHS-randstaven<sup>[6]</sup>.

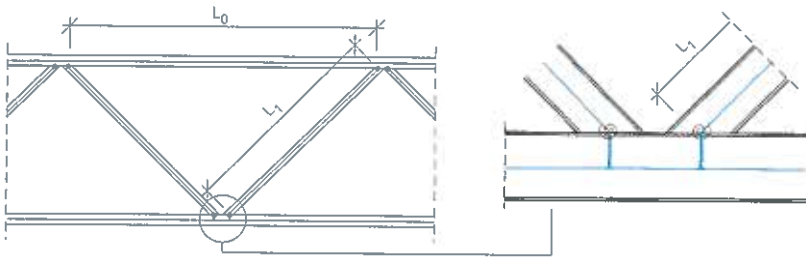
In afbeelding 12a staan de kniklengtefactoren van de randstaaf, vergeleken met de voorgeschreven kniklengtefactor van 0,9. Die is over het algemeen conservatief. Met een toename van  $\beta$  neemt de kniklengtefactor af omdat de randstaaf meer steun ondervindt van de wandstaaf door zijn toenemende buigstijfheid en door de toenemende rotatieveerijfheid van de verbinding (afb. 9). De parameter  $\gamma$  daarentegen blijkt een minimale invloed te hebben op de kniklengtefactor van de randstaven.

In afbeelding 12b zijn de kniklengtefactoren van de wandstaaf getoond en vergeleken met de voorgeschreven waarde van 0,75 en met de door CIDECT voorgeschreven kniklengtefactoren (formule (3)), aangeduid door een lijn met open cirkels. Het gestreepte deel geeft kniklengtefactoren aan volgens formule (3) in het gebied waar deze formule eigen-

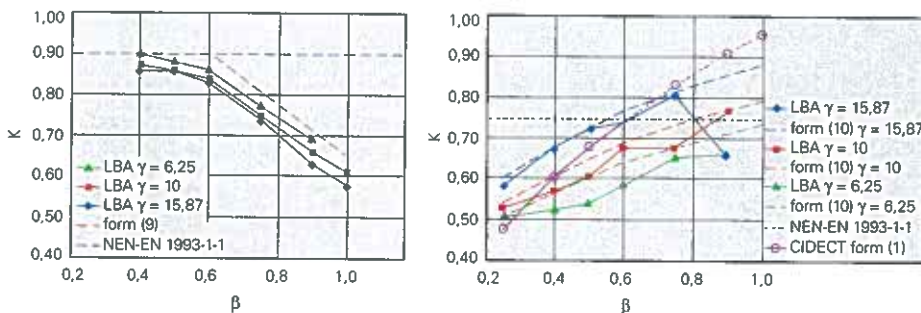
Tabel 1. Constanten in de formules (9) en (10) voor kniklengtefactoren van rand- en wandstaven.

randstaaf	wandstaaf	knik in- of uit-het-vlak	constanten randstaven		constanten wandstaven			
			A	B	C	D	E	F
SHS	SHS	in-het-vlak	1,25	-0,60	1,05	0,025	0,14	0
SHS	SHS	uit-het-vlak	1,17	-0,45	3,0	1,2	1,0	0,55
SHS	CHS	in-het-vlak	1,17	-0,45	0,95	0,030	0,14	0
SHS	CHS	uit-het-vlak	1,11	-0,25	0	1,2	1,0	0,55
CHS	CHS	in-het-vlak	1,25	-0,60	2,5	1,0	1,0	0,50
CHS	CHS	uit-het-vlak	1,17	-0,45	5,0	1,0	1,0	0,55

**Literatuur (vervolg)** 6. U. Hornung en H. Saal, H, 'A Method for Calculating the Out-of-plane Buckling Length of Diagonals of Truss Girders with Hollow Sections and K-joints', *Journal of Constructional Steel Research* 46, nr. 1-3 (paper 322, 1998), p. 489. • 7. F. Fekete, F, *Buckling Lengths of Members in Hollow Section Steel Trusses*, TU/e 2009. • 8. H.D. Boel, *Buckling Length Factors of Hollow Section Members in Lattice Girders*, MSc\_thesis, 0-2010.11, TU/e 2010. • 9. NEN-EN 1993-1-1 (Eurocode 3: Ontwerp en berekening van staalconstructies - Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen), 2006 + C2, 2011.



11. Definitie van de systeemlengthes.



12. Kniklengtefactoren voor knik in-het-vlak van staven in het vakwerk als functie van  $\beta$  voor verschillende waarden van  $\gamma$ , SHS-SHS-verbindingen met tussenruimte.

lijk niet geldig is. Het is te zien dat als  $\beta$  toeneemt, de kniklengtefactor ook toeneemt ondanks de toename van rotatieveerijfheid van de verbinding (afb. 9). Dit is te verklaren door de relatief lagere buigstijfheid van de randstaaf bij een toenemende  $\beta$ . Als  $\gamma$  toeneemt bij een gelijkblijvende  $\beta$ , dan is te zien dat ook de kniklengtefactor toeneemt. Dit wordt veroorzaakt door de afname van de rotatieveerijfheid van de verbinding bij een toenemende  $\gamma$  (afb. 9). De kniklengtefactoren van NEN-EN 1993-1-1 en CIDECT zijn in de meeste onderzochte gevallen conservatief ten opzichte van die verkregen met LBA, maar ze zijn niet voor alle gevallen conservatief.

### Voorstel voor formules voor kniklengtefactoren

Nieuwe formules voor kniklengtefactoren zijn afgeleid, zodanig dat de voorspelde kniklengtefactoren maximaal 5% onconservatief zijn vergeleken met die verkregen door LBA<sup>(6)</sup>. De formule voor de wandstaven is deels gebaseerd op de formules van CIDECT, waarbij  $\gamma$  is geïntroduceerd als extra variabele. De formules (9) en (10)

gelden voor de kniklengtefactoren van respectievelijk rand- en wandstaven. Hierin zijn A tot en met F constanten, afhankelijk van de combinatie van profieldoorsneden (SHS of CHS) en van knik in- of uit-het-vlak; zie tabel 1. De resultaten verkregen met de formules (9) en (10) zijn ter vergelijking ook weergegeven in afbeelding 12 met de gestreepte lijnen. Voor randstaven:

$$K = E + F\beta \text{ met } K \leq 0,9 \quad (9)$$

Voor wandstaven:

$$K = \left( A + B\gamma \right) \left( \beta \frac{b_1}{L_1} \right)^C + D \quad (10)$$

### Interactie bij optimalisatie?

Het voorstel voor nieuwe formules voor kniklengtefactoren geldt uitsluitend voor het vakwerk en de belastingconfiguratie van afbeelding 8. Bij deze configuratie hebben alle randstaven en wandstaven gelijke doorsneden. Daardoor knikt de randstaaf in het midden en knikt de zwaarst belaste wandstaaf aan het uiteinde van het vakwerk (afb. 10).



Foto s: bouw fotografie.nl



13. Spoorbrug De Haandrik bij Coevorden-Grambergen heeft twee vakwerkliggers met gelaste buizen.

Het knikken van de rand- en wandstaaf is als het ware ontkoppeld. Echter, als de profieldoorsneden van rand- en wandstaven worden geoptimaliseerd dan kan er interactie ontstaan tussen knik van de randstaven en knik van de wandstaven. Mogelijk zijn dan de kniklengtefactoren groter. Dit behoeft nader onderzoek.

### Conclusies en aanbevelingen

De verbindingsparameters  $\beta$  en  $\gamma$  zijn bepalend voor de kniklengtefactoren van buisprofielen in gelaste vakwerken. Bestaande formules voor kniklengtefactoren zijn over het algemeen conservatief en soms onconservatief. Voor de randstaven is alleen  $\beta$  relevant. Voor de wandstaven zijn nieuwe formules voor kniklengtefactoren gebaseerd op de CIDECT-formule en wordt naast  $\beta$  ook  $\gamma$  in rekening gebracht. De voorgestelde formules zijn geldig voor het W-vormige vakwerk en de belastingconfiguratie als onderzocht. Meer onderzoek dient te worden verricht naar andere vakwerken en belastingconfiguraties en naar de mogelijke interactie van het knikken van rand- en wandstaven in geoptimaliseerde vakwerken. •

# Kniklengtefactoren voor buisprofielen in gelaste stalen vakwerken

H.D. Boel<sup>a</sup>, H.H. Snijder<sup>b</sup>, J.C.D. Hoenderkamp<sup>b</sup>, R.C. Spoorenberg<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Ingenieursbureau Bartels

<sup>b</sup> Technische Universiteit Eindhoven, Faculteit Bouwkunde

**Wanneer buisprofielen worden toegepast in vakwerken waarbij de wandstaven aan de randstaven worden gelast, ontstaan buisverbindingen die een zekere mate van buigend moment over kunnen dragen en die een eindige stijfheid bezitten. De verbindingstijfheid heeft invloed op de kniklengtes van rand- en wandstaven van het vakwerk. In dit artikel wordt een voorstel gedaan voor kniklengtefactoren voor buisprofielen in vakwerken. Dit artikel is een uitgebreide versie van [1].**

## 1. Inleiding

Eurocode 3 (NEN-EN 1993-1-1) geeft kniklengtefactoren voor staven in vakwerken in art. BB.1. Voor buisprofielen in gelaste stalen vakwerken geeft de Eurocode  $K = 0,75$  voor wandstaven en  $K = 0,9$  voor randstaven. Hierin is  $K$  de kniklengtefactor, gedefinieerd als de kniklengte gedeeld door de systeemplengte. De genoemde waarde  $K = 0,75$  voor wandstaven geldt ongeacht de waarde van de verbindingsparameter  $\beta$ , die als volgt is gedefinieerd voor T-, Y-, en X-verbindingen en voor K- en N-verbindingen met twee identieke wandstaven:

$$\text{Voor rechthoekige of vierkante buisprofielen: } \beta = \frac{b_1}{b_0} \quad (1a)$$

$$\text{Voor ronde buisprofielen: } \beta = \frac{d_1}{d_0} \quad (1b)$$

Hierin is voor een rechthoekig buisprofiel (= rectangular hollow section = RHS) of een vierkant buisprofiel (= square hollow section = SHS):

$b_1$  de breedte van de wandstaaf;

$b_0$  de breedte van de randstaaf.

Voor een rond buisprofiel (= circular hollow section = CHS) is:

$d_1$  de diameter van de wandstaaf;

$d_0$  de diameter van de randstaaf.

In eerdere versies van Eurocode 3 mocht de kniklengtefactor  $K = 0,75$  voor wandstaven alleen worden toegepast mits  $\beta \leq 0,6$ . Volgens de oude norm NEN6771 was de eis die aan de verbindingsparameter  $\beta$  werd gesteld anders: voor RHS en SHS gold  $\beta \geq 0,6$  en voor CHS gold  $\beta \geq 0,5$ . Dit is allemaal nogal strijdig met elkaar. Bovendien ligt het voor de hand dat ook de verbindingsparameter  $\gamma$  van invloed is op de verbindingstijfheid en daarmee op de kniklengtefactoren:

$$\text{Voor rechthoekige of vierkante buisprofielen: } \gamma = \frac{b_0}{2t_0} \quad (2a)$$

$$\text{Voor ronde buisprofielen: } \gamma = \frac{d_0}{2t_0} \quad (2b)$$



Hierin is:

$t_0$  de wanddikte van de randstaaf.

In het algemeen kan worden gesteld dat de verbindingsparameters  $\beta$  en  $\gamma$  van invloed zijn op de stijfheid van buisverbindingen en daarmee op de kniklengtefactoren van wand- en randstaven in stalen vakwerken.

Om deze redenen is besloten om de invloed van de verbindingsparameters  $\beta$  en  $\gamma$  op de stijfheid van buisverbindingen en op de kniklengtefactoren van rand- en wandstaven in vakwerken numeriek te onderzoeken door middel van lineaire knikberekeningen met Ansys 11.0. Daarbij wordt zowel knik in- als uit-het-vlak van het vakwerk beschouwd. Met een lineaire knikberekening (= linear buckling analysis = LBA) worden de knikvorm en de kritieke elastische kracht van het vakwerk bepaald en daarmee kan dan de kniklengte worden vastgesteld.

## 2. Literatuuroverzicht

Naast Eurocode 3 en de oude Nederlandse norm geeft CIDECT [2] ook formules om de kniklengtefactor van wandstaven te bepalen. Formule (3) wordt bijvoorbeeld gebruikt om kniklengtefactoren van SHS wandstaven verbonden aan SHS randstaven te berekenen voor knik in- en uit-het-vlak.

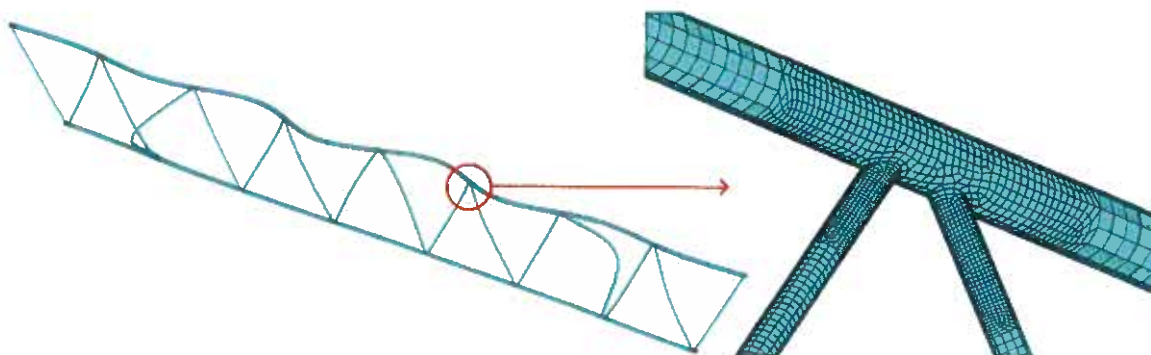
$$K = 2,3 \left( \frac{b_1^2}{L_1 b_0} \right)^{0,25} \quad \text{voor } \beta < 0,6 \quad (3)$$

Hierin is  $L_1$  de systeemplengte van de wandstaaf.

Vergelijkbare formules met andere coëfficiënten worden gegeven in [2] voor CHS wandstaven verbonden aan SHS en CHS randstaven.

Eerder onderzoek naar kniklengtes van buisprofielen in vakwerken is gepresenteerd in [3-5]. Later onderzoek [6] laat zien dat een kniklengtefactor van  $K = 0.75$  voor wandstaven, bij knik uit-het-vlak van het vakwerk, vaak aan de conservatieve kant is maar soms onconservatief.

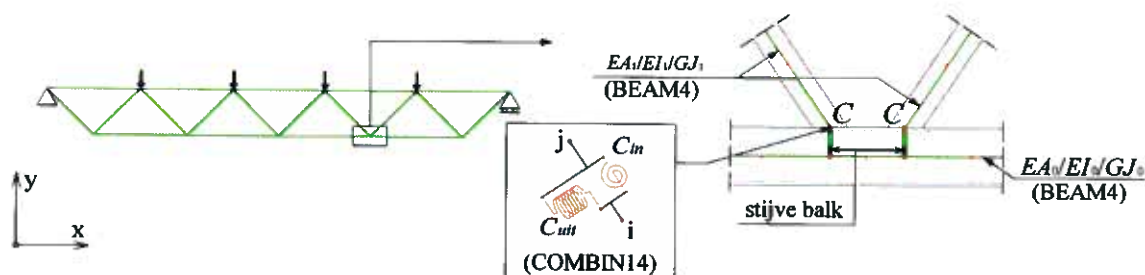
De invloed van  $\beta$  op de kniklengtefactor is numeriek onderzocht aan de TU/e [7] met behulp van LBA (ANSYS 11.0). Hierbij zijn W-vormige vakwerken (type Warren) gemodelleerd met behulp van schaalementen (zie Figuur 1). Door de randstaafafmeting constant te houden (SHS- of CHS200/6.3) en te variëren in wandstaafafmeting (SHS- of CHS50/6.3, 100/6.3, 150/6.3 en 200/6.3) is de invloed van  $\beta$  op de kniklengtefactor onderzocht. Hieruit bleek dat  $\beta$  een significante invloed heeft op de kniklengtefactor van zowel rand- als wandstaven en dat de regelgeving (Eurocode/NEN) en formules van CIDECT niet in alle gevallen een correcte waarde geven van de kniklengtefactor [7].



Figuur 1: Model van een W-vormig vakwerk opgebouwd uit schaalementen [7]

### 3. Methodologie

De kniklengtefactor wordt numeriek bepaald met behulp van een LBA. Wanneer het model van het vakwerk volledig uit schaalementen wordt opgebouwd als in [7], is het niet mogelijk de invloed van  $\beta$  en  $\gamma$  op de verbindingstijfheid en de invloed van de verbindingstijfheid op de kniklengte afzonderlijk te onderzoeken. Bij een schaalementenmodel (Figuur 1) wordt namelijk de kniklengtefactor rechtstreeks uit het knikgedrag afgeleid zonder de verbindingstijfheid apart te bepalen. Daarnaast zijn de resultaten slechts te verkrijgen door foutgevoelige handmatige post-processing indien een model met schaalementen wordt gebruikt en vergt zo'n model relatief veel rekentijd voor een LBA. Om deze redenen is besloten de rand- en wandstaven te modelleren met balkelementen (BEAM4) en de buisverbindingen met elastische rotatieveren (COMBIN14), zie Figuur 2. De rotatieveerstijfheden van de buisverbindingen zijn bepaald door de verbinding apart te modelleren met behulp van schaalementen (SHELL181) en door de verplaatsingen berekend met dit schaalementenmodel te vergelijken met die volgens een handberekening. De aldus verkregen verbindingstijfheden zijn toegekend aan de rotatieveren in het balkelementenmodel van het vakwerk waarmee vervolgens een parameteronderzoek is uitgevoerd voor diverse configuraties van rand- en wandstaven in een W-vormig vakwerk.



Figuur 2: Eindig elementenmodel van balkelementen voor wand- en randstaven en rotatieveren voor de verbindingen

Voor elke configuratie wordt eerst een eerste-orde elastische (= linear elastic analysis = LA) berekening uitgevoerd om de normaalkracht in de diverse rand- en wandstaven te bepalen. Vervolgens is een lineaire knikberekening (LBA) uitgevoerd waarmee de knikvorm en de kritieke elastische factor  $\alpha_{cr}$  van het vakwerk zijn bepaald. Dit is de factor waarmee de rekenwaarden van de belastingen moeten worden vermenigvuldigd om elastische instabiliteit te veroorzaken. Een kniklengte kan worden bepaald voor de staaf in het vakwerk die knik vertoonde. Dit vereist een kwalitatieve beoordeling van de knikvorm. Door de kritieke elastische factor  $\alpha_{cr}$  behorend bij die knikvorm te vermenigvuldigen met de normaalkracht  $N$  en het resultaat gelijk te stellen aan de Eulerse knikformule kan de kniklengte  $L_{cr}$  worden berekend:

$$L_{cr} = \sqrt{\frac{\pi^2 EI}{\alpha_{cr} N}} \quad (4)$$

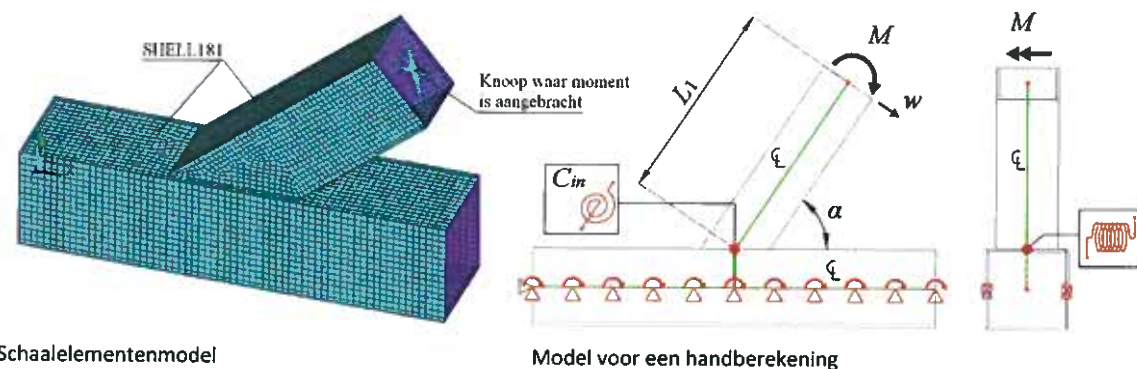
Hierin is  $EI$  de buigstijfheid van de staaf corresponderend met de richting van de knikvorm (in- of uit-het-vlak van het vakwerk). De bijbehorende kniklengtefactor  $K$  kan nu als volgt worden berekend:

$$K = \frac{L_{cr}}{L} = \sqrt{\frac{\pi^2 EI}{\alpha_{cr} NL^2}} \quad (5)$$

Hierin is  $L$  de systeemplengte van de staaf, die later nader wordt gedefinieerd.

#### 4. Bepalen van de rotatieveerstijfheid van de verbinding

Voordat lineaire knikberekeningen kunnen worden uitgevoerd moeten de rotatieveerstijfheden van de verbindingen worden bepaald. Het betreft verbindingen met een tussenruimte (Engels: gap = gaping) als weergegeven in Figuur 2. De rotatieveerstijfheid van de verbinding is in het balkelementenmodel geïmplementeerd door de knopen  $i$  en  $j$ , met dezelfde coördinaten, met elkaar te verbinden met behulp van rotatieveren. Deze knopen zijn gesitueerd op de plek waar de systeemlijn van de wandstaaf de randstaaf snijdt (punt  $C$  in Figuur 2). De excentriciteit tussen de systeemlijn van de randstaaf en punt  $C$  is gemodelleerd door middel van een oneindig stijf balkelement. Theoretisch moeten 6 verbindingsstijfheden worden aangebracht tussen de knopen  $i$  en  $j$ : drie translatie- en drie rotatieveerstijfheden. De translatieveerstijfheden in  $x$ - en  $z$ -richting zijn voor 100% stijf aangenomen. Uit oriënterende berekeningen blijkt dat de translatieveerstijfheid in  $y$ -richting (in de richting van de wandstaaf) en de rotatieveerstijfheid om de lengteas van de wandstaaf de resultaten van een LBA niet beïnvloeden. Om een correcte LBA uit te kunnen voeren dienen dus twee verbindingsstijfheden te worden gemodelleerd: de rotatieveerstijfheid  $C_{in}$  representeert de verbindingssijfheid in-het-vlak om de  $z$ -as en de rotatieveerstijfheid  $C_{uit}$  representeert de verbindingssijfheid uit-het-vlak om de  $x$ -as van de wandstaaf. De waarden van de rotatieveerstijfheden worden bepaald door verplaatsingen van de wandstaven verkregen met een schaalementenmodel van de verbinding te vergelijken met die verkregen met een relatief eenvoudige handberekening. Dit wordt in Figuur 3 geïllustreerd voor de rotatieveerstijfheid in-het-vlak  $C_{in}$ , waarbij de randstaaf volledig is gefixeerd.



**Figuur 3: Berekeningsmodellen voor de rotatieveerstijfheid van de verbinding in-het-vlak van het vakwerk**

Zowel in het schaalementenmodel als in het model voor de handberekening wordt aan het uiteinde van de wandstaaf een moment aangebracht die een verplaatsing  $w$  van het aangrijpingspunt van het moment veroorzaakt. Met het schaalementenmodel wordt de verplaatsing  $w_{eem}$  bepaald; met het model voor de handberekening wordt de verplaatsing  $w_h$  bepaald. De verplaatsing  $w_h$  is opgebouwd uit twee componenten, te weten een bijdrage van het meeveren van de verbinding en een bijdrage van het buigen van de wandstaaf:

$$w_h = \frac{ML_1}{C_m} + \frac{ML_1^2}{2EI_1} \quad (6)$$

Hierin is  $EI_1$  de buigstijfheid van de wandstaaf. Door nu de verplaatsing berekend met de eindige elementenmethode gelijk te stellen aan die volgens de handberekening kan de rotatieveerstijfheid in-het-vlak worden bepaald:

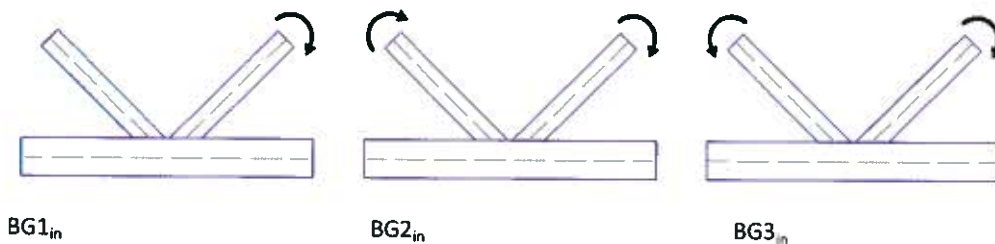
$$w_h = w_{em} = \frac{ML_1}{C_m} + \frac{ML_1^2}{2EI_1} \quad (7)$$

$$C_m = \frac{2ML_1EI_1}{2EI_1w_{em} - ML_1^2} \quad (8)$$

In het vakwerk van Figuur 2 sluiten telkens twee wandstaven op een randstaaf aan ter plaatse van de verbindingen, behalve bij de uiteinden van het vakwerk. Door een tweede wandstaaf toe te voegen wordt de verbindingstijfheid afhankelijk van het belastinggeval. Immers, een moment in de ene wandstaaf veroorzaakt een verplaatsing van het uiteinde van de andere wandstaaf door het vervormen van de wand van de randstaaf (zie Figuur 4). Om deze reden zijn drie belastinggevallen aangebracht waarmee drie verschillende waarden voor de verbindingstijfheid  $C_{in}$  zijn bepaald (zie Figuur 5).

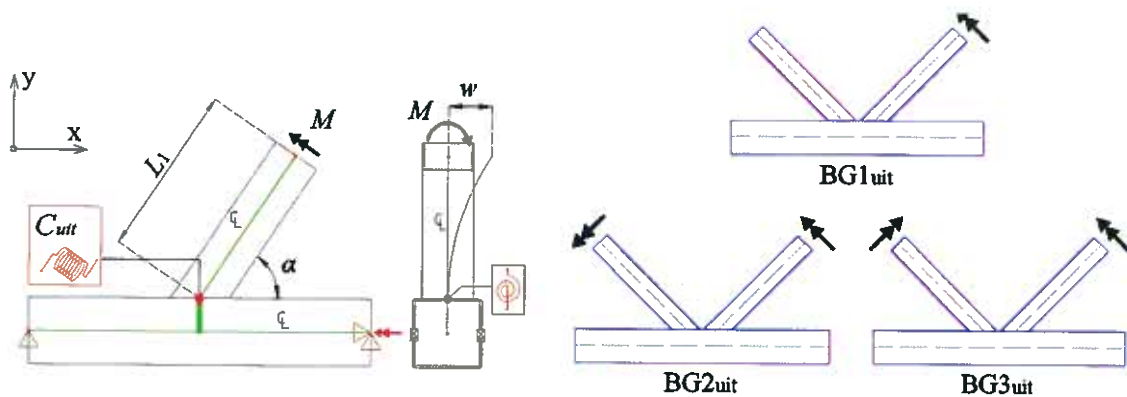


Figuur 4: Vervorming van de verbinding t.g.v. een moment aan op de rechter wandstaaf



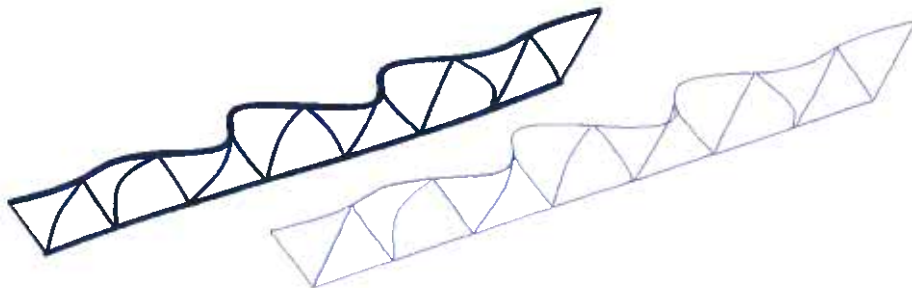
Figuur 5: Belastinggevallen (BG) om de rotatieveerstijfheid in-het-vlak  $C_{in}$  te bepalen.

Voor de rotatieveerstijfheid van de verbinding uit-het-vlak van het vakwerk is een vergelijkbare methode gebruikt met het verschil dat de randstaaf in het model van de verbinding alleen aan de uiteinden is verhinderd tegen translatie en rotatie, als weergegeven in Figuur 6. Dit zorgt voor complexere formules om de rotatieveerstijfheid van de verbinding uit-het-vlak  $C_{uit}$  te berekenen. Deze formules staan beschreven in [8].



**Figuur 6: Berekeningsmodel en belastinggevallen voor de rotatieveerstijfheid van de verbinding uit-het-vlak van het vakwerk**

Door knikvormen en kritieke elastische factoren bepaald met het balkelementenmodel (Figuur 2) te vergelijken met die bepaald met een schaalelementenmodel (Figuur 1) is vastgesteld met welk belastinggeval de rotatieveerstijfheid van de verbinding in het balkelementenmodel van Figuur 2 bepaald moet worden. Een goede overeenkomst tussen de LBA resultaten bepaald met het balkelementenmodel en het schaalelementenmodel is bepalend voor de te gebruiken belastinggevallen. Uit deze vergelijkingen bleek dat de rotatieveerstijfheid van de verbinding in-het-vlak van het vakwerk moet worden bepaald met behulp van belastinggeval BG1<sub>in</sub> (Figuur 5). De rotatieveerstijfheid van de verbinding uit-het-vlak van het vakwerk moet daarentegen worden bepaald als gemiddelde waarde van de rotatieveerstijfheden berekend voor de belastinggevallen BG1<sub>uit</sub>, BG2<sub>uit</sub> en BG3<sub>uit</sub>. Een voorbeeld van de vergelijking van knikvormen met een balk- en schaalelementenmodel is weergegeven in Figuur 7.



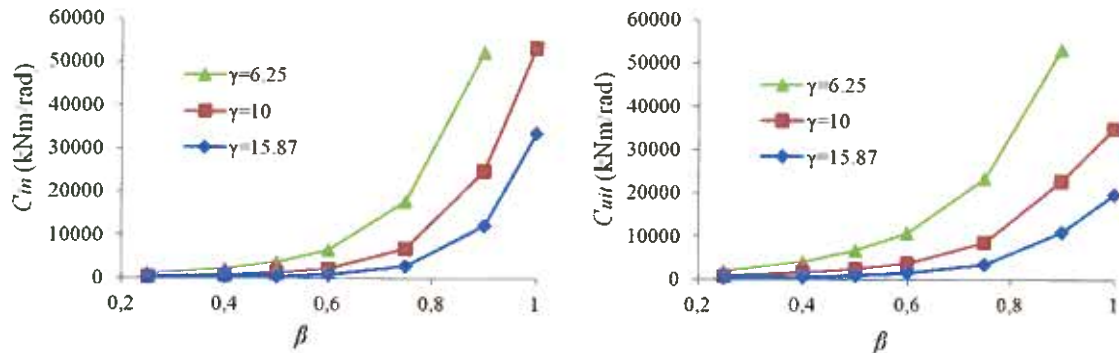
**Figuur 7: Vergelijking van knikvormen verkregen met een schaalelementenmodel (links) en een balkelementenmodel (rechts)**

## 5. Parameteronderzoek

Om de invloed van de verbindingparameters  $\beta$  en  $\gamma$  op de kniklengtefactor te bepalen zijn lineaire knikberekeningen uitgevoerd voor een realistische W-vormige vakwerkgeometrie, opgelegd op een scharnier en een rol; zie Figuur 8. Hierbij zijn gangbare profieldoorsneden toegepast en is gevarieerd in wandstaafafmeting en in de wanddiktes van de randstaven. Alle randstaven hebben dezelfde profieldoorsnede. Alle wandstaven hebben ook dezelfde profieldoorsnede. Per vakwerk zijn dus maximaal twee verschillende profieldoorsneden toegepast. De bovenste randstaaf is ter plaatse van



de wand van de randstaaf wordt minder op buiging belast. Een toename van  $\gamma$  (afname van de wanddikte van de randstaaf) betekent een afname van de verbindingstijfheid. Een kleinere wanddikte van de randstaaf geeft een kleinere stijfheid van de wand van de randstaaf en heeft dus een nadelig effect op de rotatieveerstijfheid van de verbinding.

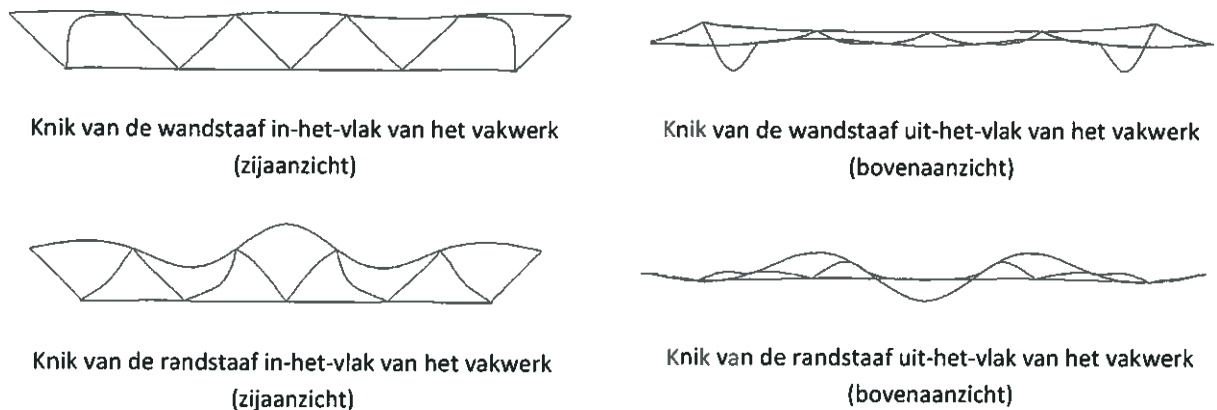


Figuur 9: Rotatieveerstijfheden in-het-vlak  $C_{in}$  (links) en uit-het-vlak  $C_{uit}$  (rechts) als functie van de verbingsparameter  $\beta$  voor verschillende waarden van de verbingsparameter  $\gamma$  - SHS-SHS verbindingen met tussenruimte

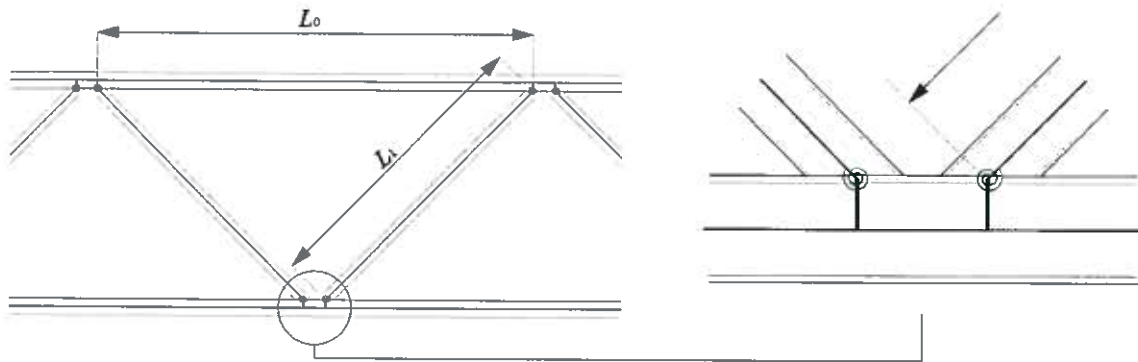
De berekende rotatieveerstijfheden van de verbindingen zijn toegepast in het balkelementenmodel van Figuur 2.

## 7. Invloed van verbingsparameters op de kniklengtefactoren

Vervolgens zijn lineaire knikberekeningen (LBA) uitgevoerd. Figuur 10 laat de vier relevante knikvormen zien voor SHS100/6,3 wandstaven in combinatie met SHS200/6,3 randstaven. Op basis van deze lineaire knikberekeningen zijn kniklengtefactoren  $K$  berekend met Formule (5). Daarbij is de systeemplengte gedefinieerd als de afstand tussen de snijpunten van de systeemlijn van de wandstaaf met de wand van de randstaaf, als weergegeven in Figuur 11.



Figuur 10: Knikvormen verkregen met het balkelementenmodel voor een vakwerk met wandstaven SHS100/6,3 en randstaven SHS200/6,3



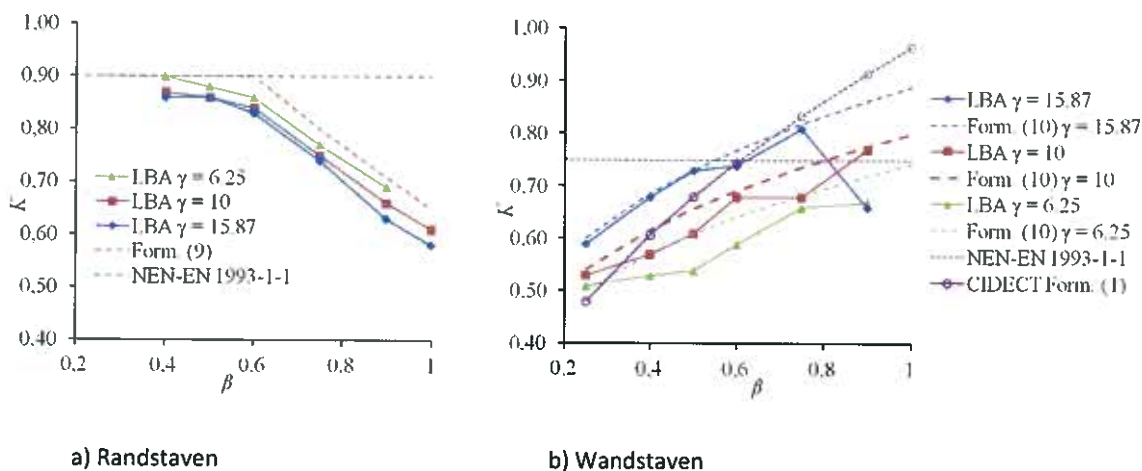
**Figuur 11: Definitie van de systeemlengtes**

In Figuur 12 worden de kniklengtefactoren getoond die zijn verkregen door middel van LBA voor knik in-het-vlak van vakwerken met SHS rand- en SHS wandstaven (doorgetrokken lijnen). Soortgelijke resultaten zijn verkregen voor kniklengtefactoren voor knik uit-het-vlak en voor CHS wandstaven gelast aan SHS en CHS randstaven; zie [8].

In Figuur 12a zijn de kniklengtefactoren van de randstaaf getoond en vergeleken met de in art. BB.1 van NEN-EN 1993-1-1 voorgeschreven kniklengtefactor van 0,9. Die laatste waarde blijkt over het algemeen conservatief te zijn. Met een toename van de verbindingsparameter  $\beta$ , neemt de kniklengtefactor af omdat de randstaaf meer steun ondervindt van de wandstaaf door zijn toenemende buigstijfheid en door de toenemende rotatieveerstijfheid van de verbinding (Figuur 9). De parameter  $\gamma$  daarentegen blijkt een minimale invloed te hebben op de kniklengtefactor van de randstaven.

In Figuur 12b zijn de kniklengtefactoren van de wandstaaf getoond en vergeleken met de in art. BB.1 van NEN-EN 1993-1-1 voorgeschreven kniklengtefactor van 0,75 en met de door CIDECT voorgeschreven kniklengtefactoren volgens Formule (3), aangeduid door middel van een lijn met open cirkels. Het gestippelde deel van deze CIDECT-lijn geeft kniklengtefactoren aan volgens Formule (3) in het gebied waar deze formule eigenlijk niet geldig is. Het is te zien dat als de verbindingsparameter  $\beta$  toeneemt, de kniklengtefactor ook toeneemt ondanks de toename van rotatieveerstijfheid van de verbinding (Figuur 9). Dit is te verklaren door de relatief lagere buigstijfheid van de randstaaf bij een toenemende  $\beta$ . Als de verbindingsparameter  $\gamma$  toeneemt bij een gelijkblijvende verbindingsparameter  $\beta$ , dan is te zien dat ook de kniklengtefactor toeneemt. Dit wordt veroorzaakt door de afname van de rotatieveerstijfheid van de verbinding bij toenemende verbindingsparameter  $\gamma$  (Figuur 9). De kniklengtefactoren van NEN-EN 1993-1-1 en CIDECT zijn in de meeste onderzochte gevallen conservatief ten opzichte van die verkregen met LBA maar ze zijn niet voor alle gevallen conservatief.





Figuur 12: Kniklengtefactoren voor knik in-het-vlak van het vakwerk als functie van de verbindingsparameter  $\beta$  voor verschillende waarden van de verbindingsparameter  $\gamma$  - SHS-SHS verbindingen met tussenruimte

## 8. Voorstel voor formules voor kniklengtefactoren

Nieuwe formules voor kniklengtefactoren zijn afgeleid zodanig dat de voorspelde kniklengtefactoren maximaal 5% onconservatief zijn vergeleken met die verkregen door LBA [8]. De formule voor de wandstaven is deels gebaseerd op de formules van CIDECT, waarbij de verbindingsparameter  $\gamma$  is geïntroduceerd als extra variabele.

De Formules (9) en (10) gelden voor de kniklengtefactoren van respectievelijk rand- en wandstaven. Hierin zijn  $A$  t/m  $F$  constanten, afhankelijk van de combinatie van profieldoorsneden (SHS of CHS) in de verbindingen en van knik in- of uit-het-vlak; zie Tabel 1.

$$\text{Voor randstaven: } K = E + F\beta \text{ met } K \leq 0,9 \quad (9)$$

$$\text{Voor wandstaven: } K = (A + B\gamma) \left( \beta \frac{b_1}{L_1} \right)^C + D \quad (10)$$

Tabel 1: Constanten in de Formules (9) en (10) voor kniklengtefactoren van rand- ( $A$ ,  $B$ ) en wandstaven ( $C$  t/m  $F$ )

Randstaaf	Wandstaaf	Knik in- of uit-het-vlak	Constanten randstaven		Constanten wandstaven			
			$A$	$B$	$C$	$D$	$E$	$F$
SHS	SHS	in-het-vlak	1,25	-0,60	1,05	0,025	0,14	0
SHS	SHS	uit-het-vlak	1,17	-0,45	3,0	1,2	1,0	0,55
SHS	CHS	in-het-vlak	1,17	-0,45	0,95	0,030	0,14	0
SHS	CHS	uit-het-vlak	1,11	-0,25	0	1,2	1,0	0,55
CHS	CHS	in-het-vlak	1,25	-0,60	2,5	1,0	1,0	0,50
CHS	CHS	uit-het-vlak	1,17	-0,45	5,0	1,0	1,0	0,55

De resultaten verkregen met de Formules (9) en (10) zijn ter vergelijking ook weergegeven in Figuur 12 door middel van de gestreepte lijnen.

## 9. Discussie

Het voorstel voor nieuwe formules voor kniklengtefactoren geldt alleen voor het vakwerk en de belastingconfiguratie van Figuur 8. Bij deze configuratie hebben alle randstaven dezelfde profieldoorsnede en ook alle wandstaven hebben dezelfde profieldoorsnede zodat maximaal twee verschillende profieldoorsneden zijn gebruikt. Daardoor knikt de randstaaf in het midden en knikt de zwaarst belaste wandstaaf aan het uiteinde van het vakwerk (Figuur 10). Het knikken van de rand- en wandstaaf is als het ware ontkoppeld. Echter, als de profieldoorsneden van rand- en wandstaven worden geoptimaliseerd dan kan er interactie ontstaan tussen knik van de randstaven en knik van de wandstaven. Mogelijk zijn dan de kniklengtefactoren groter. Dit behoeft nader onderzoek.

## 10. Conclusies en aanbevelingen

De verbindingsparameters  $\beta$  en  $\gamma$  zijn de bepalende parameters voor de kniklengtefactoren van buisprofielen in gelaste vakwerken. Het is gebleken dat bestaande formules voor kniklengtefactoren over het algemeen conservatief zijn en soms onconservatief. Verbeterde nieuwe formules om kniklengtefactoren te bepalen van rand- en wandstaven in gelaste stalen W-vormige vakwerken (type Warren) opgebouwd uit buisprofielen met verbindingen met tussenruimte zijn voorgesteld in dit artikel. Voor de randstaven is alleen de verbindingsparameter  $\beta$  relevant. Voor de wandstaven zijn de nieuwe formules voor kniklengtefactoren gebaseerd op de CIDECT-formule en wordt naast de verbindingsparameter  $\beta$  ook de verbindingsparameter  $\gamma$  in rekening gebracht. De voorgestelde formules zijn geldig voor het W-vormige vakwerk en de belastingconfiguratie als onderzocht. Meer onderzoek dient te worden verricht naar andere vakwerken en belastingconfiguraties en naar de mogelijke interactie van het knikken van rand- en wandstaven in geoptimaliseerde vakwerken.

## Literatuur

- [1] Snijder, HH, Boel, HD, Hoenderkamp, JCD, Spoorenberg, RC, Buckling length factors for welded lattice girders with hollow section braces and chords, *Eurosteel 2011 – 6th European Conference on Steel and Composite Structures*, August 31-September 2, 2011, Budapest, Hungary, Edited by L Dunai, M Iványi, K Jármai, N Kovács and LG Vigh, Published by ECCS, Brussels, Belgium, ISBN 978-92-9147-103-4, pp. 1881-1886.
- [2] Rondal, J, Würker, K-G, Dutta, D, Wardenier, J, Yeomans, N, *Structural Stability of Hollow Sections*, CIDECT (Comité International pour le Développement et l'Etude de la Construction Tubulaire), Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1992.
- [3] Mouty, J, *Effective Lengths of Lattice Girder Members*, CIDECT, Monograph no. 4, 1980.
- [4] Grimault, JP, *Buckling Length of Hollow Section Web Members Welded To Hollow Section Chords*, CIDECT, Report 3E-80E, 1980.
- [5] Rondal, J, *Effective Lengths of Tubular Lattice Girder Members – Statistical Tests*, CIDECT, Report 3K-88/9, 1988.
- [6] Hornung, U, Saal, H, "A Method for Calculating the Out-of-plane Buckling Length of Diagonals of Truss Girders with Hollow Sections and K-joints", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 46, No. 1-3, pp. 489 paper number 322, 1998.
- [7] Fekete, F, "Buckling Lengths of Members in Hollow Section Steel Trusses", MSc thesis, Dept. of Architecture Building and Planning, Eindhoven University of Technology, The Netherlands, 2009
- [8] Boel, HD, *Buckling Length Factors of Hollow Section Members in Lattice Girders*, MSc thesis, Dept. of Architecture Building and Planning, Eindhoven University of Technology, The Netherlands, 2010.