

# Kiezen voor warmgevormde of koudgevormde rechthoekige buisprofielen

Regelmatig komen bij de Helpdesk van Bouwen met Staal vragen binnen over rechthoekige buisprofielen. Welke eisen gelden er voor koudgevormde rechthoekige buisprofielen? En wat zijn precies de verschillen tussen koudgevormde en warmgevormde buisprofielen? Bouwen met Staal vroeg professor Wardenier de meest voorkomende vragen te beantwoorden. De belangrijkste aanbeveling is bij het constructief ontwerpen rekening te houden met de specifieke eigenschappen van warm- en koudgevormde buisprofielen. Ze zijn niet zonder meer uitwisselbaar.

## *Prof.dr.ir. J. Wardenier*

Jaap Wardenier is emeritus hoogleraar TU Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen en adviseur staalconstructies.

Afbeelding 1. Het vormen van een rond buisprofiel uit coil.



Warmgevormde en koudgevormde buisprofielen worden op een verschillende manier gefabriceerd. Dat heeft tot gevolg dat ze ook constructief op enkele punten verschillen, waarvan de hoekafronding en de koudvervorming in de hoeken de belangrijkste zijn. Bij het constructief ontwerpen moet met deze verschillen rekening worden gehouden:

- bij een koudgevormd profiel zijn de hoekafrondingen groter, waardoor de statische waarden lager zijn. Hierdoor vraagt de aansluiting van profielen met gelijke breedte bij de hoeken meer laswerk;
- volgens de Eurocode geldt bij belasting op druk voor warmgevormde buisprofielen de knikkromme a. Als gevolg van de hogere residuele spanningen (restspanningen) in het materiaal geldt voor koudgevormde buisprofielen de lagere kromme c;
- bij koudgevormd profielen stelt de Eurocode eisen aan de minimum binnenhoekafrondingsstralen om de effecten van de koudvervorming in combinatie met lassen op de taatheid te beperken;
- voor een zelfde toepassing, met name indien in of bij de hoeken wordt gelast, is volgens NEN 6774 voor koudgevormde buisprofielen een hogere staalkwaliteit vereist dan voor warmgevormde buisprofielen;
- om bij verzinken scheurvorming in de hoeken te voorkomen, dient het staal volledig of aluminium-gekalmeerd ( $Al \geq 0,02\%$ ) te zijn en geschikt voor verzinken.

## **Niet uitwisselbaar**

Door de verschillen in constructieve eigenschappen zijn de twee typen buisprofielen niet zonder meer uitwisselbaar. Is in de berekening uitgegaan van warmgevormde buisprofielen en worden die vervangen door koudgevormde buisprofielen, dan moeten de statische sterkte (met name bij druk en/of buiging), de vereiste hoekafronding en de vereiste staalkwaliteit worden geëvalueerd. Koudgevormde profielen van aluminium-gekalmeerde fijnkorrelige staalsoorten met een laag koolstofgehalte en die voldoen aan de eisen voor de binnenhoekafrondingen (volgens tabel 1), hebben een uitstekende taatheid en voldoen nagenoeg altijd aan de vereiste staalkwaliteit. Indien de constructeur in de berekening is uitgegaan van koudgevormde buisprofielen en het is de bedoeling warmgevormde toe te passen, dan vereist dit alleen een controle van de staalsoort en de staalkwaliteit. Als regel kan de staalkwaliteit lager kan zijn dan die voor koudgevormde profielen. Er is nog een belangrijk verschil: koudgevormde buisprofielen zijn bij dezelfde breedte en dikte per lengte-eenheid goedkoper dan warmgevormde buisprofielen. Het is van belang om vooral koudgevormde buisprofielen te betrekken van betrouwbare leveranciers, die goede producten leveren. Dit geldt met name indien er een krapte op de markt is.



### Fabricage

Warmgevormde rechthoekige buisprofielen worden gemaakt van ronde buisprofielen. Meestal is dit een langснаad gelast, rond buisprofiel, maar voor de zeer dikwandige profielen soms een naadloos buisprofiel. Eerst wordt het profiel verhit tot ongeveer 1200 °C. Daarna wordt het door walsen gevoerd om het gewenste rechthoekige- of vierkante buisprofiel te verkrijgen. De wanddikte wordt zonodig verkleind met een strekductieproces. Warmgevormde buisprofielen hebben een relatief kleine hoekafronding en, door de gelijkmatige afkoeling, lage residuele spanningen. Het oppervlak is door het warme proces vergelijkbaar met dat van andere warmgewalste profielen.

Koudgevormde rechthoekige buisprofielen kunnen worden gemaakt door een rond buisprofiel zonder verwarming via walsen te vervormen. Een andere mogelijkheid is een coil (lange strip) direct te vervormen tot een rechthoekige doorsnede en dan de kanten aaneen te lassen. Het oppervlak van deze koudgevormde buisprofielen is glad en de hoekafrondingen zijn groter dan bij warmgevormde buisprofielen. Door de koudvervorming ontstaan grote residuele spanningen, vooral in de hoeken. Afhankelijk van de staalsoort, de staalkwaliteit, de hoekradius en de wanddikte neemt de taaiheid af en nemen de vloeigrens en treksterkte toe. Wordt naderhand in de koudvervormde zone gelast, dan moeten eisen worden gesteld

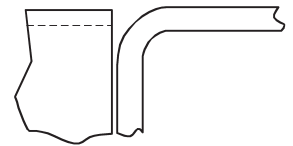
om voldoende taaiheid te garanderen en veroudering te voorkomen. Er zijn ook buisprofielen op de markt, die koudgevormd zijn, maar direct daarna zijn gegloeid om de residuele spanningen te verlagen. De uitgloeitemperatuur van ongeveer 580 °C is zodanig, dat er geen korrelgroei optreedt. De residuele spanningen in deze profielen zijn lager dan bij koudgevormde buisprofielen, maar hoger dan bij warmgevormde buisprofielen. Vaak ligt de waarde van de hoekafronding tussen die van beide fabricageprocessen in.

### Statische eigenschappen

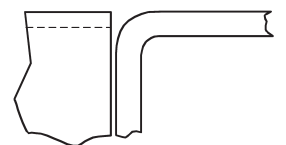
Bij eenzelfde breedte en dikte hebben koudgevormde buisprofielen lagere statische waarden door de grotere hoekafronding. Naarmate de dikte groter is, worden de verschillen groter. Voor de doorsnede bedraagt het verschil zo'n 2 tot 8%; voor het weerstandsmoment kan deze procentuele afname zelfs het dubbele bedragen.

### Mechanische eigenschappen

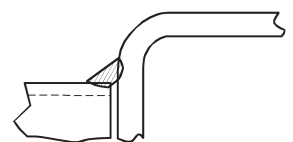
Bij warmgevormde buisprofielen zijn de vloeigrens en treksterkte over de doorsnede vrijwel gelijk. Bij koudgevormde rechthoekige buisprofielen niet; door de koudvervorming is de vloeigrens in de hoeken aanzienlijk hoger dan in de vlakke delen. In de hoeken is ook de treksterkte hoger, evenals de verhouding tussen vloeigrens en treksterkte. De breukrek is in de hoeken lager dan in de vlakke delen. Door deze effecten is voor koudgevormde buizen een



koudgevormd  $\beta=1,0$



warmgevormd  $\beta=1,0$



koudgevormd  $\beta < 1,0$

Afbeelding 2. Effect van de hoekafronding voor de fabricage.

Tabel 1. Minimale binnenhoekaf rondingen voor koudgeformde rechthoekige buisprofielen waarbij in of nabij de hoeken kan worden gelast (volgens tabel 4.2 van prEN 1993-1-8: 2004).

r/t	rek door koudvervorming	maximum dikte (mm)		
		algemeen		volledig gekalmeerd of Al-gekalmeerd staal (Al ≥ 0,02 %)
		overwegend statisch belast	op vermoeiing belast	
≥ 25	≥ 2	elke	elke	elke
≥ 10	≥ 5	elke	16	elke
≥ 3,0	≥ 14	24	12	24
≥ 2,0	≥ 20	12	10	12
≥ 1,5	≥ 25	8	8	10
≥ 1,0	≥ 33	4	4	6



Tabel 2. Waarden van de invloedsfactor door koudvervorming voor ΔT in °C (volgens NEN 6774)

in °C gelast op afstand kleiner dan 5t en/of thermisch verzinkt	nee	ja
buigen bij r/t < 5 voor t ≤ 10 en f ≤ 90° (ΔT in °C)	-25	-40
buigen bij r/t < 5 voor t > 10 en f > 90° (ΔT in °C)	-40	-55

waarin:

r is de binnenbuigstraal;

t is de materiaaldikte;

f is de buighoek, zijnde de hoek waarover het materiaal wordt geboden

Tabel 3. Representatieve waarden van de referentietemperatuur voor de kerfslagproef, T<sub>k,rep</sub> in °C (volgens NEN 6774)

aanduiding staalkwaliteit	T <sub>k,rep</sub> in °C
JR	20
J0	0
J2	-20
N, M	-30
NL, ML	-50

Tabel 3a. Kerfslagwaarde voor ongelegeerde staalsoorten (volgens NEN-EN-10027).

aanduiding	JR	J0	J2
kerfslagwaarde	27 Joules		
temperatuur	+20°C	0 °C	-20 °C

Tabel 3b. Kerfslagwaarde voor fijnkorrelige staalsoorten (volgens NEN-EN-10027).

normaal gegloeide staalsoorten staalnaam	kerfslagwaarde	
	°C	J
S275NH	-20	40
S275NLH	-50	27
S355NH	-20	40
S355NLH	-50	27
S460NH	-20	40
S460NLH	-50	27

Thermo-mechanisch gewalste staalsoorten: in plaats van de aanduidingen N en NL worden de aanduidingen M en ML gebruikt.

hogere staalkwaliteit vereist om gelijkwaardig te zijn met warmgeformde buisprofielen. Vroeger werd de aanduiding van een staalsoort gebaseerd op de eigenschappen van het uitgangsmateriaal vóór koudvervorming. Daarom was in de voorschriften (RB '82) opgenomen dat de verhoogde vloeigrens door koudvervorming (ten dele) in rekening mocht worden gebracht. Nu wordt in de normen uitgegaan van de gegarandeerde eigenschappen van het eindproduct; dus bij koudgeformde buisprofielen is de verhoogde vloeigrens door koudvervorming al (ten dele) in rekening gebracht.

### Leveringsnormen

Warmgeformde buisprofielen worden geleverd volgens NEN-EN 10210, koudgeformde buisprofielen volgens NEN-EN 10219. Gegloeide koudgeformde buisprofielen worden meestal ook geleverd volgens NEN-EN-10210. Hierbij garandeert de fabrikant dus, dat deze qua gebruik equivalent zijn aan warmgeformde buisprofielen, ondanks de iets lagere statische eigenschappen en de iets hogere residuele spanningen. Deze profielen worden in het algemeen geleverd met een laag koolstofgehalte. De staalsoort wordt volgens NEN-EN-10027 aangeduid met bijvoorbeeld S355J2H. Hierin is:

- S een aanduiding voor het gebruik van het staal, in dit geval 'structural';
- 355 de vloeigrens;
- J2 de kerfslagwaarde bij een bepaalde temperatuur, in dit voorbeeld -20 °C;

- H het type profiel, hier een buisprofiel ('hollow').

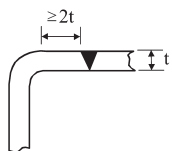
De kerfslagwaarde is af te lezen uit de tabellen 3a en 3b. Voor een eenduidige bestelling moet de norm, de staalsoort en de staalkwaliteit worden vermeld. Bijvoorbeeld NEN-EN 10210 S355J0H voor warmgeformde buisprofielen en NEN-EN 10219 S355J2H voor koudgeformde buisprofielen.

### Hoekaf ronding

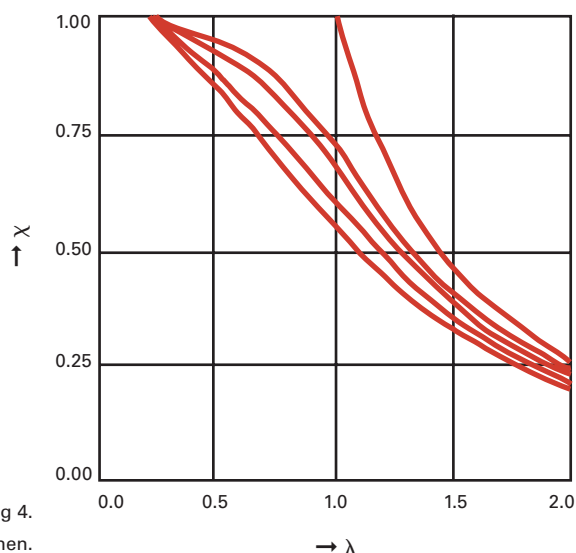
Om te voorkomen dat koudvervorming tot nadelige eigenschappen voor de constructieve toepassing leidt, geeft de Eurocode 3 eisen voor de binnenhoekaf rondingen (zie tabel 1) [3, 5, 12, 14, 17, 18, 19]. Profielen die hieraan voldoen, mogen overal worden gelast, dus ook in de koudgeformde zone.

Heeft een profiel een kleinere binnenhoekaf ronding, dan moet door proeven worden aangetoond, dat na het lassen in de hoeken de taaiheid onder de gebruiksomstandigheden voldoende is.

De waarden voor aluminium-gekalmeerde staalsoorten komen tot een wanddikte van 12 mm ongeveer overeen met de gemiddelde waarden volgens NEN-EN 10219 Deel 2. Moet bij een grotere dikte in de hoeken worden gelast, dan eist de Eurocode grotere binnenhoekaf rondingen dan NEN-EN 10219. Bij kleinere binnenhoekaf rondingen mag tot een afstand van 5t vanaf de buitenhoekaf rondingen



Afbeelding 3.  
Eis aan de langснаad.



Afbeelding 4.  
Knikkrommen.

niet worden gelast, tenzij door proeven is aangetoond dat dit voor het betreffende product wel kan.

Door de grotere hoekafrondingen bij koudgevormde profielen is het gewenst de aansluiting met andere profielen zo te kiezen, dat deze eenvoudig uitvoerbaar is. Dat wil zeggen: kies de breedte van het aansluitende buisprofiel kleiner dan dat van het profiel waarop wordt aangesloten, dus  $b < 1,0$  (zie afbeelding 2).

Indien de breedten gelijk zijn, dus bij  $b = 1,0$ , dan is het lassen aan de zijden bij warmgevormde buisprofielen eenvoudiger, door de kleinere hoekafronding.

### Staalkwaliteit

De vereiste staalkwaliteit kan worden bepaald volgens NEN 6774 door een referentietemperatuur  $T_{k,d}$  te bepalen waarbij de kerfslagwaarde een minimum waarde van 27J moet hebben.

In formuleform:

$$T_{k,d} \leq T_{m,d} + T_d + \sum \Delta T - T_{t,d}$$

Waarin:

- $T_{m,d}$  is de equivalente temperatuur die volgt uit de vloeigrens;
- $T_d$  is de ontwerptemperatuur;
- $T_{t,d}$  is de materiaaldikte in mm;
- $\sum \Delta T$  is een term voor verschillende invloedsfactoren (zie ook tabel 3):
  - de belastingssnelheid, voor normaal gebruik  $0^\circ\text{C}$ ;

- de verbindingmethode, voor gelast-niet star  $10^\circ\text{C}$ ;
- het statisch systeem, voor statisch onbepaald  $0^\circ\text{C}$ ;
- consequentie van falen, voor ernstige schade  $0^\circ\text{C}$ ;
- koudvervorming, voor lassen bij hoeken op  $\leq 5t$ ;  $r/t < 5$ ;  $t \leq 10$  mm en  $\theta \leq 90^\circ$  geldt  $-40^\circ\text{C}$ .

Hieruit volgt voor warmgevormde buisprofielen:

$$\sum \Delta T = 0 + 10 + 0 + 0 + 0 = +10^\circ\text{C}$$

En voor koudgevormde buisprofielen:

$$\sum \Delta T = 0 + 10 + 0 + 0 - 40 = -30^\circ\text{C}$$

Het verschil in referentietemperatuur wordt dus alleen bepaald door de mate van koudvervorming en varieert bij buisprofielen afhankelijk van het gebruik en de dikte tussen  $-25^\circ\text{C}$  en  $-55^\circ\text{C}$ .

### Thermisch verzinken

Indien de buisconstructie thermisch wordt verzinkt, dan kunnen residuele spanningen bij asymmetrische constructies aanleiding geven tot vervormingen. Koudgevormde buisprofielen zijn hiervoor dus gevoeliger dan warmgevormde buisprofielen.

Bij de bestelling van staal dient altijd te worden opgegeven, dat het geschikt moet zijn voor thermisch verzinken. Hierbij zijn het silicium-

en fosforgehalte van belang [1]. Silicium-gekalmeerd staal kan aanleiding geven tot scheurvorming en is dus niet geschikt voor verzinken. Thermisch verzinken bij ongeveer  $460^\circ\text{C}$  heeft nagenoeg geen effect op de mechanische eigenschappen.

### Toleranties

Door de huidige geperfectioneerde fabricage technieken kunnen vooral koudgevormde profielen met zeer kleine diktetoleranties worden gemaakt. Dit heeft er zelfs toe geleid dat in sommige landen zoals de VS (waar in de normen wel een diktetolerantie geldt maar geen of een te grote gewichtstolerantie) buisprofielen op de markt werden gebracht, waarbij de dikte aan de ondergrens van de diktetolerantie lag. Dit had tot gevolg dat in de constructienormen weer werd gesteld, dat bij de constructieve berekeningen slechts 95% van de nominale dikte in rekening mocht worden gebracht [10]. Dit maakt de zaken natuurlijk onnodig gecompliceerd. Hier is de kans op dergelijke praktijken gering, omdat de Europese normen diktetoleranties eisen in combinatie met een gewichtstolerantie. De langснаad van de buisprofielen dient op voldoende afstand van de hoek te liggen. In [5, 14, 18] wordt hiervoor vanaf de hoekafronding een afstand van  $2t$  aanbevolen (zie afbeelding 3).

### Sterkte-eigenschappen

In een vorige versie van de Eurocode was het



### Voorbeeldberekening

Voor S355 bedraagt de equivalente temperatuur  $T_{m,d} = 55^{\circ}\text{C}$ .

Als ontwerptemperatuur geldt bijvoorbeeld  $-20^{\circ}\text{C}$ , zodat  $T_d = -20^{\circ}\text{C}$ .

De materiaaldikte is 10 mm, zodat  $T_{r,d} = 10^{\circ}\text{C}$ .

De referentietemperatuur is dus  $T_{k,d} \leq 55 + (-20) + \Sigma\Delta T - 10 = 25 + \Sigma\Delta T$

Voor warmgevormde buisprofielen bedraagt deze:  $T_{k,d} \leq 25 + 10 = 35^{\circ}\text{C}$ ;

voor koudgevormde buisprofielen:  $T_{k,d} \leq 25 - 30 = -5^{\circ}\text{C}$ .

Volgens tabel 3 is dus in dit voorbeeld voor warmgevormde buisprofielen de staalkwaliteit JR voldoende, terwijl voor koudgevormde buisprofielen een J2 kwaliteit vereist is.

Voor wanddikten groter dan 10 mm bedraagt  $\Sigma\Delta T = -45^{\circ}\text{C}$  en dus  $T_{k,d} = -20^{\circ}\text{C}$ . dat betekent dat ook hier minimaal een staalkwaliteit NEN-EN 10219 S355 J2H vereist is. Ook fijnkorrelige staalsoorten met de aanduiding NH, MH, NLH of MLH komen in aanmerking.

evenals in de huidige NEN 6770 mogelijk om voor koudgevormde buisprofielen uit te gaan van de knikkromme b, maar dan wel met de vloiegrens van het uitgangsmateriaal vóór koudvervorming. Nu dient bij druk de knikkromme c te worden aangehouden als gevolg van de hogere residuele spanningen. Voor warmgevormde buisprofielen kan de hogere knikkromme a worden genomen (zie afbeelding 3). Afhankelijk van de slankheid kan de knikspanning voor koudgevormde buisprofielen dan 0 tot 20% lager liggen dan voor warmgevormde buisprofielen. In combinatie met een 2 tot 8% kleinere doorsnede kan dit aanzienlijke afwijkingen geven.

Doordat tegenwoordig voor de staalsoort de eigenschappen van het uiteindelijke product gelden, zijn er voor andere belastingen geen verschillen tussen koud- en warmgevormde profielen, behalve dan die worden veroorzaakt door de iets lagere statische waarden van koudgevormde profielen (zie 'profiel eigenschappen'). In de verbindingsterkte treedt zowel statisch als bij vermoeiing geen verschil op tussen koud- en warmgevormde profielen, indien buisprofielen voldoen aan de hiervoor geformuleerde kwaliteitseisen en hoekaf rondingen. Dit blijkt uit onderzoek [18]. ●

### Literatuur

1. Anoniem. Thermisch verzinken van de staalbouw. Thermisch Verzinken, Jaargang 34, 2005.
2. Doorn, R. van, en Endstra, C.J. TGB 1990; Voor- schriften en consequenties in toepassing buis- profielen. Bouwen met Staal nr. 98, 1991.
3. Eurocode 3: prEN 1993-1-8: 2004: Design of steel structures. Part 1.8: Design of Joints. CEN, Brussel.
4. Hole, E.F. Structural Hollow Sections. Steel Designations and Structural Safety. New Steel Construction, July/Augustus, 1998.
5. IIW-XV-E. Design recommendations for hollow section joints – Predominantly statically loaded. IIW Doc. XV-701-89. International Institute of Welding (IIW), Subcommittee XV-E, 1989.
6. NEN-EN-10027 Systemen voor het aanduiden van staalsoorten – Deel 1: Aanduiding met symbolen. Ontwerp juli 2001, NEN.
7. NEN-EN-10210 Warmvervaardigde gelaste buis- profielen voor constructiedoeleinden van onge- legerd en fijnkorrelig staal. Deel 1: Technische leveringsvoorwaarden. Deel 2: Toleranties, afmetingen en profiëleigenschappen. Ontwerp 2003, NEN.
8. NEN-EN-10219 Koudvervaardigde gelaste buis- profielen voor constructiedoeleinden van onge- legerd en fijnkorrelig staal. Deel 1: Technische leve- ringsvoorwaarden. Deel 2: Toleranties, afmetingen en profiëleigenschappen. Ontwerp 2003, NEN.
9. NEN 6774 Eisen aan de staalkwaliteit voor constructiestaalsoorten in relatie tot het brosse breukgedrag voor overwegend statisch belaste constructies. NEN, 2000.
10. Packer, J.A. Overview of current international design guidance on hollow structural section connections. Proc. Third International Offshore and Polar Engineering Conference, Singapore, Vol. IV, 1993.
11. Kostecki, N., Packer, J.A. and Puthli, R.S. Notch toughness of cold-formed hollow sections. Rev. final Cidect report 1B-2/03.
12. Pech, P. Schweißen kaltverformter Baustähle mit Wanddicken von 2 bis 6 mm. Schweißen und Schneiden, Heft 11, 1980.
13. Puthli, R.S. Welding in cold-formed areas of rectangular hollow sections. Cidect report 1A-6/05.
14. RB'82 Richtlijnen voor de berekening van buis- constructies. RB'82, Staalbouwkundig Genoot- schap, 1982.
15. Soinen, R. Fracture behaviour and assessment of design requirements against fracture in welded steel structures made of cold-formed rectangular hollow sections. Thesis Lappeenranta University, Finland 1996.
16. Steidl, G. und Buçak, Ö. Hohlprofile aus Stahl mit Rechteckquerschnitten. Bänder, Bleche und Rohre, Vogel Verlag Würzburg-Düsseldorf, Heft 6, 1979.
17. Veit, H.J. Probleme des Schweißens in Bereich Kaltverformten Profile, Schweißen und Schneiden, Heft 3, 1968.
18. Wardenier, J. Hollow Section Joints. Delft Uni- versity Press, 1982.
19. Wardenier, J. Hollow Sections in Structural Applications. Uitgever: Bouwen met Staal, 2002.