

Stabiliteit uit het vlak van vrijstaande stalen bogen (1)

Auteurs:

ir. R.C. (Roel) Spoorenberg

Materials innovation institute M2i, Delft
en TU Eindhoven, faculteit bouwkunde

prof. ir. (Bert) H.H. Snijder

TU Eindhoven, faculteit bouwkunde

dr. ir. J.C.D. (Hans) Hoenderkamp

TU Eindhoven, faculteit bouwkunde

Samenvatting

Vrijstaande stalen bogen worden heden ten dage veelvuldig toegepast als constructief element in bruggen en daken. Doordat deze bogen geen zijdelingse steunen hebben zijn ze zeer gevoelig voor knik uit het vlak. Echter, in de huidige normen zijn geen rekenregels beschikbaar waarmee de weerstand tegen knik uit het vlak kan worden getoetst. Aan de Technische Universiteit Eindhoven is het gebrek aan rekenregels herkend en een promotie-onderzoek naar de stabiliteit van stalen bogen gestart. In dit artikel wordt een kort overzicht van de resultaten van het onderzoek gegeven. Stalen bogen worden vaak gefabriceerd door het koudbuigen van rechte I-vormige staalprofielen. Dit proces heeft ingrijpende invloed op de constructieve eigenschappen van de boog en hierdoor ook op de weerstand tegen knik. Door middel van experimenten en eindige elementen analyses is de invloed van het profielbuigproces van I-profielen op de restspanningen en materiaaleigenschappen onderzocht. Uit eerder onderzoek is gebleken dat bestaande knikkrommen kunnen worden gebruikt voor het bepalen van de draagkracht van vrijstaande bogen. Aanvullende eindige elementen analyses zijn uitgevoerd om dit resultaat te bevestigen. De laatste fase van het onderzoek is gericht op het bepalen van een knikkromme, waarin de invloed van het buigproces is verdisconteerd. Wanneer voldoende informatie bekend is over het knikken van vrijstaande bogen kan de rekenregel worden geëxtrapoleerd naar bogen met andere doorsneden of bogen met enige zijdelingse steunen.

1 Inleiding

Bogen worden steeds vaker toegepast als constructief element in daken en bruggen (afbeelding 1) vanwege hun unieke combinatie van architectonische uitstraling en constructieve meerwaarde. Wanneer bogen weinig tot geen zijdelingse steun hebben kunnen deze echter zeer gevoelig worden voor knik uit het vlak. De huidige Europese normen kennen geen toetsingsregels om na te gaan of een vrijstaande boog onder gegeven belastingen voldoende stabiel is. Een ontwerpend constructeur is daarom genoodzaakt een boog naar eigen inzicht te ontwerpen wat enerzijds tot oneconomisch

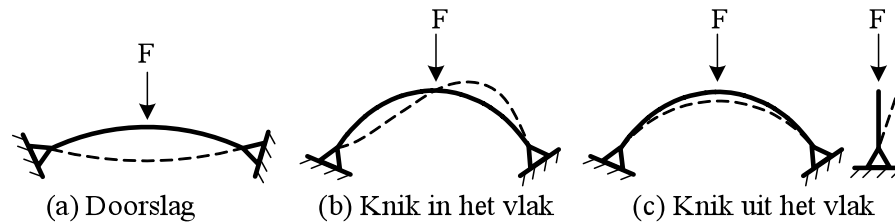
materiaalgebruik en anderzijds tot onveilige bouwconstructies kan leiden. Het gebrek aan rekenregels is aanleiding geweest tot de start van een onderzoek. Doel van het onderzoek is het ontwikkelen van rekenregels die het constructieve gedrag van bogen weerspiegelen en de imperfecties in beschouwing nemen. Dit artikel geeft een eerste overzicht van de huidige stand van het onderzoek.



1. Vrijstaande boog, Snipperlingse Brug, Deventer, (Hans van Heeswijk Architecten).

2 Stabiliteit van Bogen

De constructieve meerwaarde van bogen in vergelijking tot balkconstructies of portalen wordt gekarakteriseerd door het feit dat het merendeel van de belastingen kan worden afgedragen door middel van normaalkracht. De hoge normaalkracht in een boog wordt gerealiseerd doordat de uiteinden van de boog niet kunnen ‘uitspreiden’ en de boog als het ware ‘opgesloten’ zit tussen de opleggingen. Bij de meeste belastinggevallen speelt buiging een kleine rol van betekenis wat leidt tot een relatief kleine doorsnede en dus optimaal materiaalgebruik. De aanwezigheid van deze hoge normaalkracht in de boog in combinatie met een grote slankheid maakt een boog echter gevoelig voor knik. Deze knikgevoeligheid zorgt ervoor dat de capaciteit van de doorsnede niet volledig kan worden benut, analoog aan het knikken van kolommen en kippen (zijdelings knikken en roteren) van balken. Wanneer lokale knik of plooi in de boog (delen) niet in ogenschouw wordt genomen, kan instabiliteit van een boog worden onderverdeeld in drie knikvormen: doorslag, knik in het vlak en knik uit het vlak (afbeelding 2). Afhankelijk van de belastingen, doorsnede-eigenschappen, de aanwezigheid van zijdelingse steunen en de booggeometrie is een van deze drie knikvormen maatgevend. Het huidige onderzoek is toegespitst op knik uit het vlak, wat voor vrijstaande stalen bogen in de meeste gevallen het belangrijkste ontwerpcriterium is. De vrijstaande boog (dus zonder zijdelingse steunen) is het basisgeval voor knik van bogen uit het vlak en dit vormt de opmaat voor bogen die wel zijdelings gesteund zijn. Het onderzoek is beperkt tot cirkelvormige bogen.



2. Knikvormen van bogen

3 Buigproces

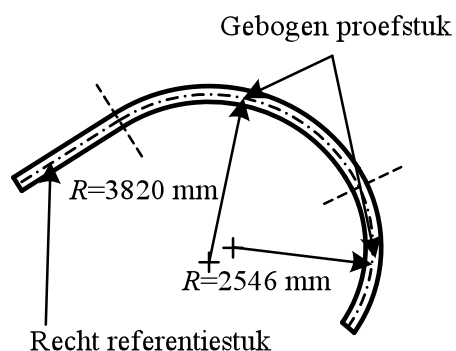
Het fabriceren van bogen kan op verschillende manieren, afhankelijk van de gewenste vorm van de doorsnede en de afmetingen van de boog. Voor grote bogen zoals toegepast in bruggen wordt vaak gebruik gemaakt van plaatmateriaal en worden door middel van lassen kokervormige boogdelen gefabriceerd. Een ander veel voorkomend proces is profielbuigen. Dit is een proces waarbij een recht profiel bij kamertemperatuur wordt gebogen tot een boog. Het rechte profiel wordt in de profielbuigmachine geplaatst en een combinatie van doorvoeren en buigen van het profiel zorgt voor een permanente kromming (afbeelding 3). Het huidige onderzoek spitst zich toe op I-vormige profielen die gemaakt zijn door middel van het profielbuigen. I-profielen kunnen zowel om de zwakke as als om de sterke as worden gebogen, echter dit onderzoek beperkt zich tot het laatste geval.



3. Profielbuigen van een HE 100A bij Kersten Europe BV in Wanssum (links) en het eindresultaat: een HE 100A met een buigstraal van 1910 mm (rechts).

Door het buigen van het staal bij kamertemperatuur zullen de mechanische eigenschappen (vloeispanning, uiterste treksterkte, rek bij breuk) en de restspanningen in het profiel veranderen. Deze veranderde constructieve eigenschappen zijn uiteindelijk weer van invloed op de respons van een boog en dienen dus te worden verdisconteerd in de te ontwikkelen rekenregels.

Om de invloed van het profielbuigproces zorgvuldig vast te stellen is een experimenteel programma uitgevoerd. Dit uitgebreide programma omvat verschillende I-profielen, staalsoorten en buigstralen (Tabel 1). De variabelen zijn zodanig gekozen dat een goede vergelijking mogelijk is met eerder onderzoek. De krommingratio is de verhouding tussen de buigstraal R en de nominale hoogte van een profiel en reflecteert de mate van koudbuigen. Bogen met een kleine krommingratio ondergaan grotere plastische rekken in vergelijking tot bogen met een grote krommingratio. Iedere boog is gevormd uit een recht stuk staal, waarbij per balk één of twee boogstukken zijn gebogen (afbeelding 4). Per boog is een recht referentiestuk beschikbaar, dat dient om de toestand van het profiel weer te geven voor het buigen. Dit rechte referentiestuk wordt onderworpen aan dezelfde experimenten ter bepaling van de restspanningen en materiaaleigenschappen als voor de gebogen proefstukken.



4. Gebogen proefstukken, gevormd uit een enkele balk met een recht referentie stuk.

Een beknopt overzicht van de experimentele resultaten betreffende de restspanningen en mechanische eigenschappen wordt in volgende subparagrafen gegeven.

Tabel 1 Onderzochte bogen

I-profiel	Staalsoort	Buigstraal [mm]	Krommingratio R/h [-]
HE 100A	S235, S355	1910, 2546, 3820	19.89, 26.52, 39.79
HE 100B	S235, S355	1910, 2546, 3820	19.1, 2.546, 3.82
HE 360B	S235, S355	8000	22.22
IPE 360	S235, S355	4500, 8000	12.5, 22.22

3.1 Restspanningen

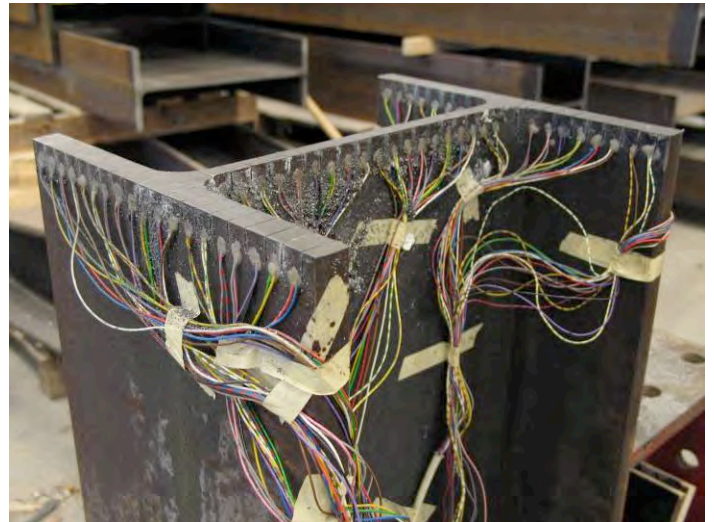
Balkstaal bevat restspanningen die het constructieve gedrag aanzienlijk kunnen beïnvloeden. Voor rechte warmgewalste en gelaste profielen zijn restspanningen uitvoerig gemeten en geïmplementeerd in de rekenregels voor kolommen en balken. De restspanningen in het balkstaal voor het buigproces veranderen door het buigen en een nieuw patroon verschijnt. Om inzicht te krijgen in de aangepaste restspanningen is een tweevoudige onderzoeksanpak toegepast. De restspanningen werden gemeten in het Pieter van Musschenbroek laboratorium van de Technische Universiteit

Eindhoven en het buigproces van profielen werd gesimuleerd met behulp van eindige elementen analyses om de gemeten restspanningen te verifiëren.

3.1.1 Experimenten

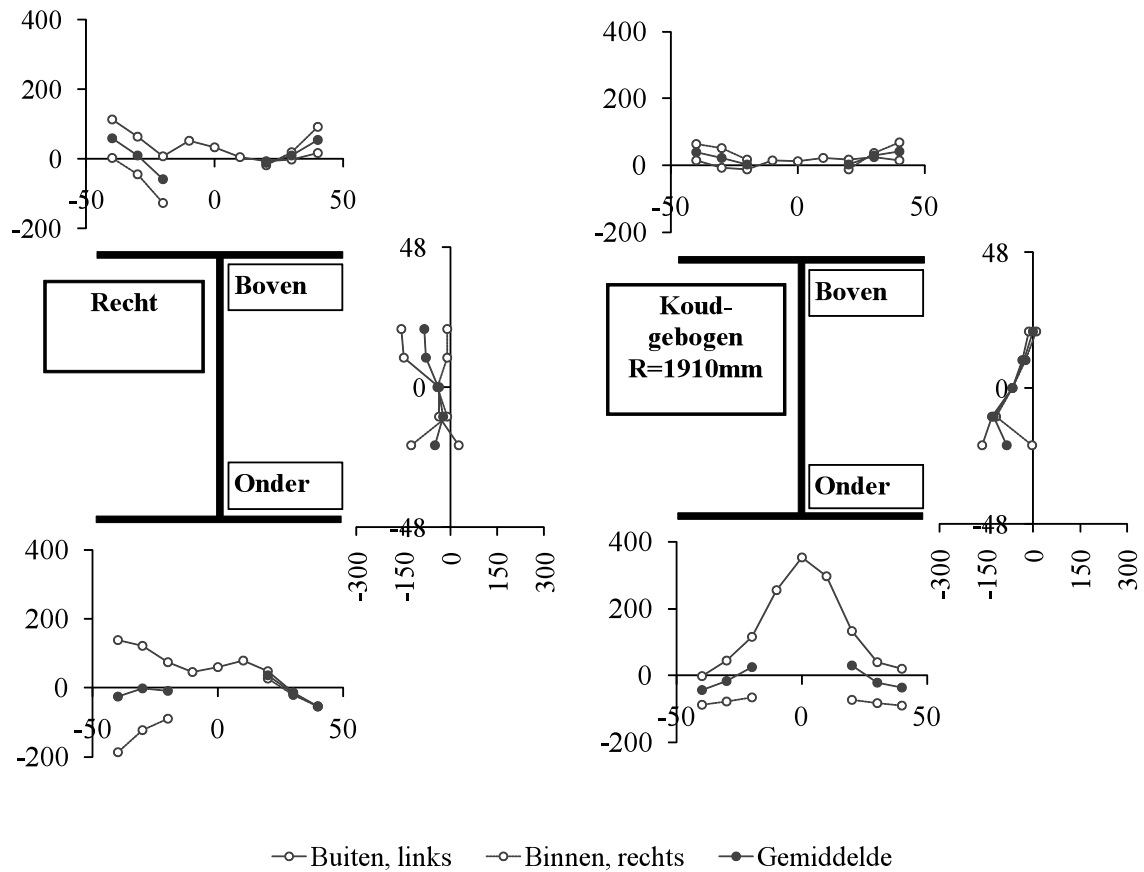
Restspanningen werden zowel gemeten in de rechte referentiestukken als in het koudgebogen staal om inzicht te krijgen in de invloed van het buigproces. De restspanningen in de rechte profielen vormden de referentie voor de restspanningen gemeten in de koudgebogen profielen. De experimentele resultaten werden eerder gepubliceerd in [4, 7] en worden in deze paragraaf beknopt weergegeven.

Restspanningen werden gemeten met behulp van de zogenaamde ‘sectioning method’. Rekstroken werden geplaatst over het profiel. De rekstroken werden op 10 mm afstand ten opzichte van elkaar geplaatst. Vervolgens werd het materiaal langs de rekstroken doorgezaagd (afbeelding 5). Eerst werd de balk machinaal doorgezaagd daarna werden met de hand inkepingen naast de rekstroken gezaagd. Tijdens het zagen werd voldoende koelvloeistof over het proefstuk en de rekstroken gesproeid om temperatuursinvloeden zoveel mogelijk uit te sluiten. Tijdens het zagen komen de restspanningen in het materiaal vrij, hetgeen gepaard gaat met een kleine rekverandering. Deze rekverandering wordt gemeten door de rekstroken. Met behulp van de wet van Hooke kunnen de rekken worden teruggerekend naar restspanningen, en kan per rekstrook een unieke waarde van de restspanning worden verkregen.

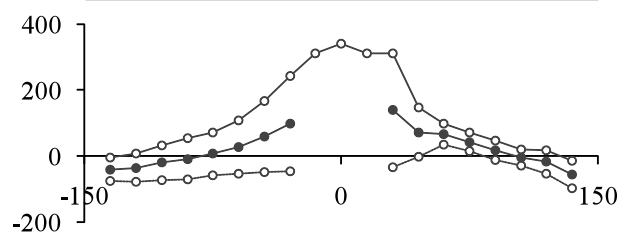
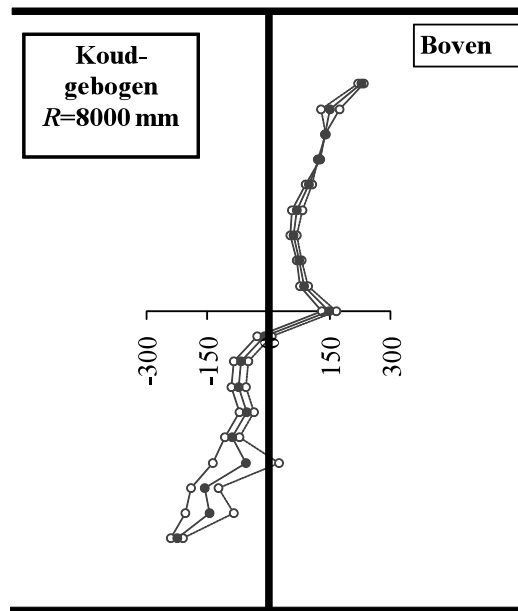
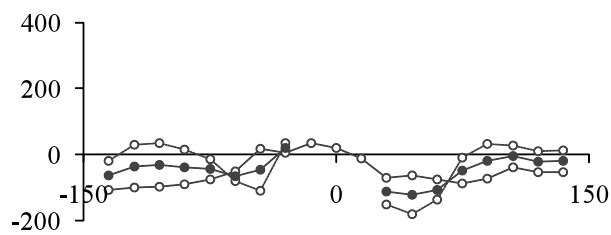
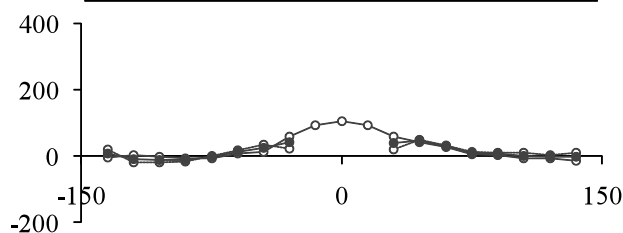
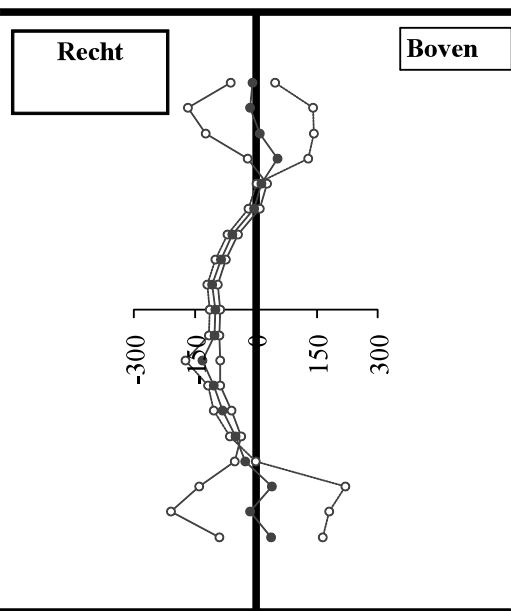
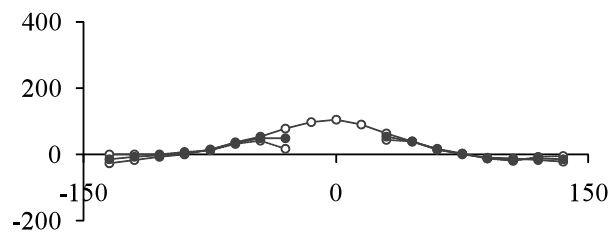


5. Zagen van profielen (HE 360B) met rekstroken voor het meten van restspanningen (links) proefstuk na einde van de proef (rechts) [4].

Een overzicht van de experimenteel bepaalde restspanningen voor recht balkstaal en koudgebogen balkstaal is gegeven in afbeelding 6 en afbeelding 7. De topflens en de onderflens zijn respectievelijk plastisch opgerekt en verkort tijdens het buigproces. Duidelijk is te zien dat het restspanningspatroon aanzienlijk is veranderd door het profielbuigen. Hoge restspanningen in trek werden gemeten ter plaatse van de lijf-flens-kruising in de onderflens en hoge drukspanningen in het lijf. Het grotendeels dubbel symmetrische patroon is vervangen door een enkel symmetrisch patroon.



6. Restspanningen in een HE 100A S235 voor en na het profielbuigen, restspanningen in N/mm^2 , [4]

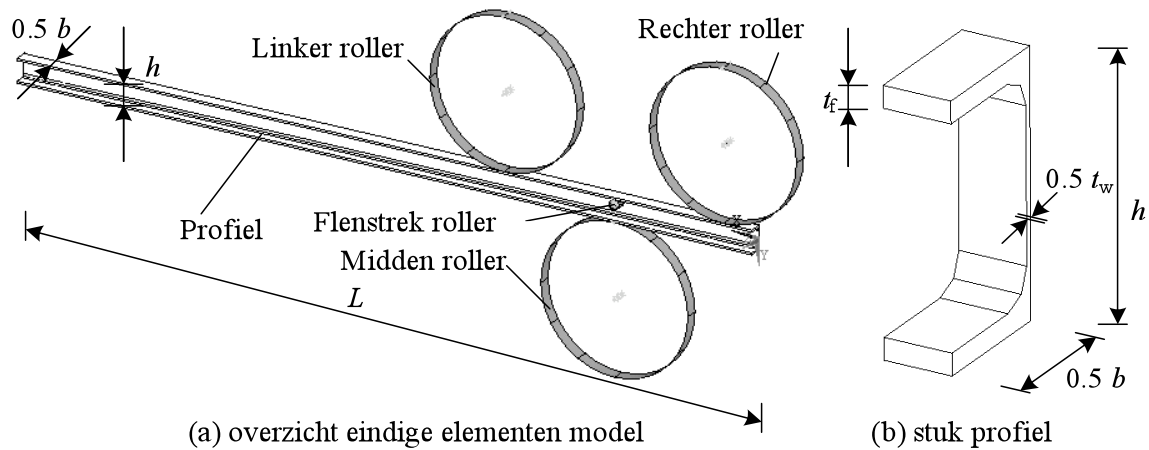


—○— Buiten, links —○— Binnen, rechts —●— Gemiddelde

7. Restspanningen in een HE 360B S235 voor en na het koudbuigen, restspanningen in N/mm^2 , [4]

3.1.2 Eindige elementen analyses

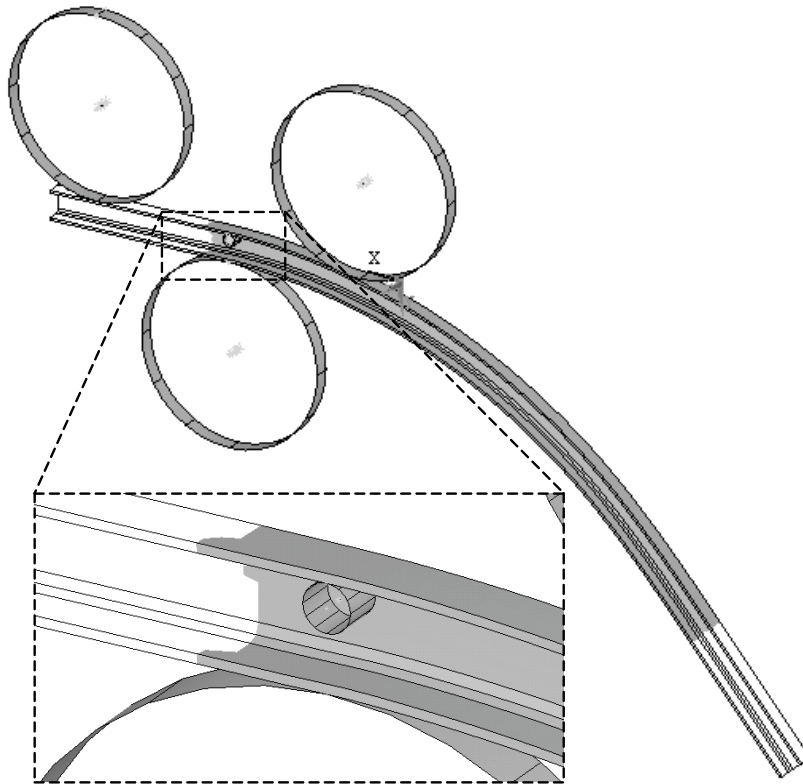
Om een goed inzicht te krijgen in de restspanningen ten gevolge van het profielbuigen zijn naast experimenten ook eindige elementen analyses uitgevoerd. Een volledig overzicht van de eindige elementen analyses is gepubliceerd in [5-6, 8]. Het gebruikte eindige elementenprogramma is ANSYS release 11.0. Het 3D eindige elementen model bestaat uit een 3-tal grote rollen en een kleine zogenaamde flenstrekkroller van de profielbuigmachine (afbeelding 8) en de te buigen balk. De balk is geplaatst tussen de rollen waarbij er gebruikt is gemaakt van spiegelsymmetrie in het model om de berekeningstijd te reduceren. De interactie tussen de rollen en de balk is mogelijk gemaakt door het toepassen van contactelementen. Het eindige elementen model is uitgerust met een materiaalmodel dat is gebaseerd op de resultaten van trekproeven uit de rechte referentiestukken (afbeelding 4).



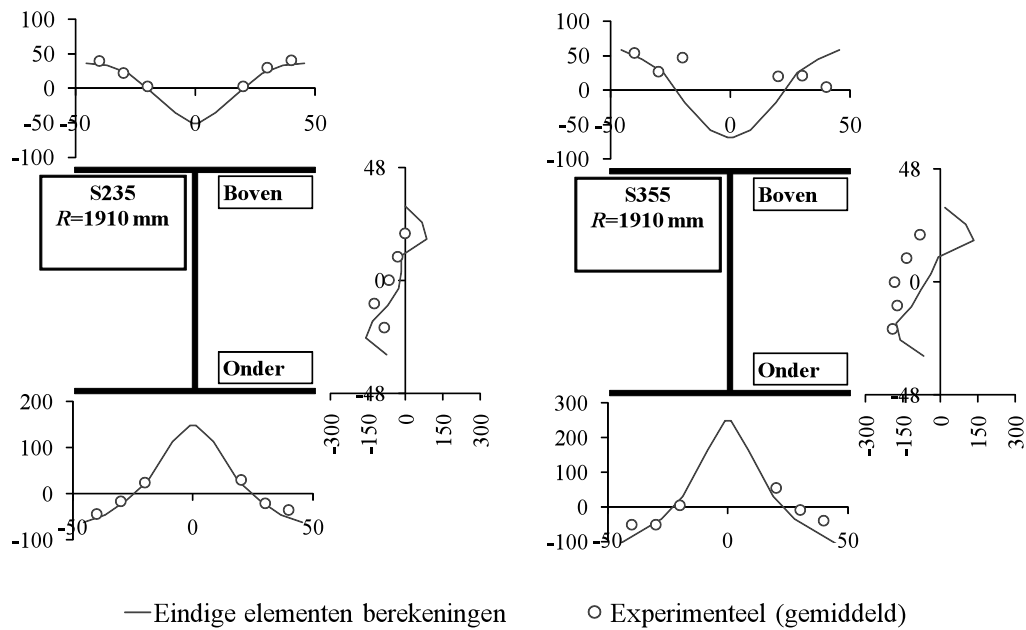
8. Eindige elementen model (HE 100A), [5].

Een combinatie van het neerwaarts bewegen van de rechter roller en het doorvoeren van de balk van links naar rechts bewerkstelligt een permanente rek over de doorsnede wat resulteert in een boog (afbeelding 9). De grijze arcering in afbeelding 9 geeft de plastische rekken weer. Duidelijk is daarin dat de eindstukken van de boog niet plastisch kunnen worden vervormd. Deze moeten in de praktijk worden beschouwd als restafval. De rechter roller moet voldoende naar beneden bewegen om daadwerkelijk plastische rekken te induceren in het profiel. Wanneer de beweging van deze roller naar beneden onvoldoende is, dan zal het profiel simpelweg elastisch ‘terugveren’ zodra het uit de rollen komt, aangezien in dat geval alleen elastisch rekken zijn ingebracht.

De spanningsverdeling in de boog representeert de restspanningsverdeling na buigen. De restspanningen uit het eindige elementen model zijn vergeleken met de gemiddelde waarden uit de experimenten (afbeelding 10) en een redelijk goede overeenkomst tussen proef en berekening werd gevonden. Doordat er geen rekstroken aan de binnenkant van de flenzen ter plaatse van het lijf kunnen worden geplaatst kunnen op deze locaties geen gemiddelde waarden worden gevonden. De hoge piekspanningen ter plaatse van de lijf-flens-kruising konden alleen numeriek worden bepaald.



9. Complete simulatie, figuur overgenomen uit [5].



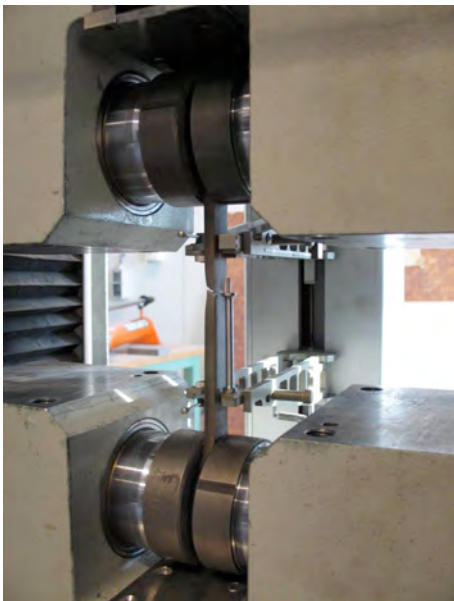
10 Vergelijking tussen gemeten restspanningen en berekende restspanningen met de eindige elementen methode, HE 100A, buigstraal van 1910 mm, staalsoort S235 en S355. Restspanningen in N/mm^2 , [5].

3.2 Mechanische eigenschappen

Recht balkstaal heeft een vloeigrens, treksterkte en rek bij breuk die voldoen aan de specificaties zoals gesteld in de huidige voorschriften. Tengevolge van het buigproces zal het materiaal een andere vloeisterkte en treksterkte krijgen en de taaiheid zal worden gereduceerd, aangezien het materiaal wordt koudvervormd.

De mate van deze veranderingen zal mede afhangen van de grootte van de buigvervorming (of krommingsratio) en de locatie van het materiaal in de doorsnede. Bogen met een kleinere krommingsratio zullen een grotere verandering van (bijvoorbeeld) de vloeigrens ondergaan in vergelijking tot bogen met een grotere krommingsratio. Staal ter plaatse van de neutrale lijn zal minder koudvervorming ondervinden in vergelijking tot materiaal in de flenzen en zal dus een kleinere verandering van (bijvoorbeeld) de vloeigrens ondergaan. Trekproeven werden daarom uitgevoerd op proefstaven, die op verschillende locaties uit het profiel zijn gefreesd.

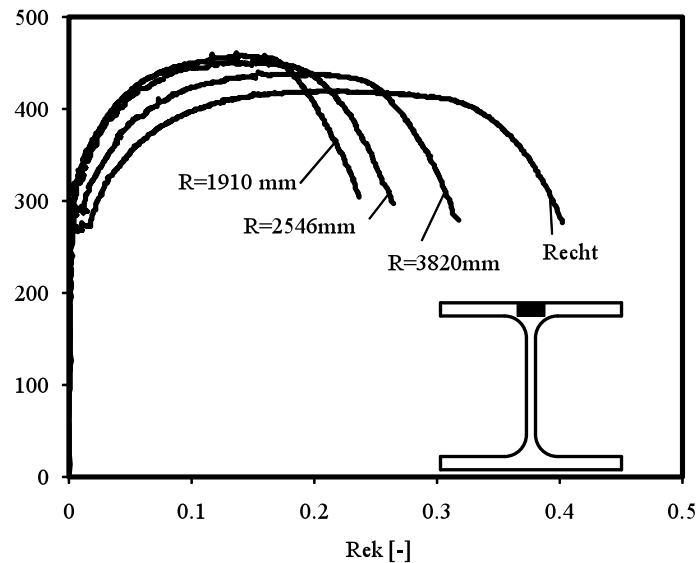
Proefstaven werden in een trekbank in het Pieter van Musschenbroek laboratorium ingespannen en belast tot breuk (afbeelding 11). De krachts-verplaatsings-karakteristiek werd ‘omgezet’ naar een spannings-rek diagram. De afmetingen van het proefstuk waren conform NEN-EN 10002.



11. Trekproefopstelling (links) en proefstukken (rechts).

Een representatief voorbeeld van de invloed van het buigproces op de mechanische eigenschappen is gegeven in afbeelding 12. De mechanische eigenschappen van het materiaal ter plaatse van de kruising van de topflens en het lijf zijn weergegeven voor gebogen HE 100A profielen en vergeleken met een rechte HE 100A. Het is duidelijk dat met een verkleining van de buigstraal de vloeisterkte en treksterkte toenemen en de rek bij breuk afneemt. Het karakteristieke

vloeiplaatje zoals meestal aanwezig in recht constructiestaal verdwijnt en het koudvervormde staal bezit een geleidelijke overgang tussen elastisch en plastisch gedrag.

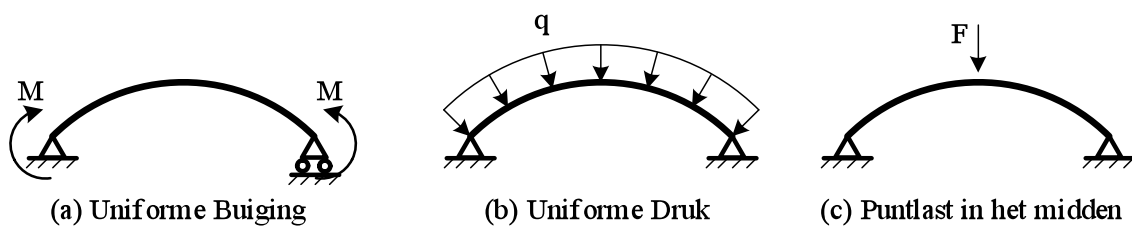


12. Spannings-rek diagram HE 100A, staalsoort S235

4 Rekenregels

Uit de voorgaande paragraaf is gebleken dat door het profielbuigen significante veranderingen in restspanningen en mechanische eigenschappen optreden. Voor het ontwikkelen van rekenregels voor stalen bogen moet de invloed van het profielbuigen worden verrekend. In deze paragraaf wordt een eerste aanzet tot de rekenregels gegeven. Dit gebeurt eerst zonder de invloed van het profielbuigen. In een latere fase van het onderzoek zal dit worden meegenomen.

Constructieve elementen zoals kolommen en balken, waarvoor knik een belangrijk ontwerpcriterium is, worden getoetst met behulp van knikkrommen, zoals gegeven in de NEN 6770 en NEN-EN 1993-1-1, Eurocode 3. Eerder uitgevoerd numeriek onderzoek [1] en experimenteel onderzoek [2] heeft uitgewezen dat knikkrommen ook kunnen worden toegepast om de stabiliteit van bogen te toetsen voor knik uit het vlak. Deze bevindingen zijn echter beperkt tot bogen onder uniforme druk, uniforme buiging of voor bogen belast door een puntlast in het midden (afbeelding 13).



13. Belastinggevallen voor bogen.

4.1 Uniforme druk en buiging

Voor bogen onder uniforme buiging of uniforme druk werd een groot aantal eindige elementen berekeningen uitgevoerd [1]. Per boog werd de slankheid bepaald als de wortel van de ratio tussen plastische weerstand en de elastische kritieke kniklast uit het vlak, analoog aan de slankheid zoals bepaald voor kolommen. De plastische weerstand is voor bogen onder uniforme buiging of bogen onder uniforme druk gelijk aan respectievelijk het plastische moment en de plastische axiale weerstand. Voor de kritieke knikbelasting uit het vlak zijn formules gegeven, deels gebaseerd op eerder onderzoek.

De bezwijkbelasting zoals gevonden met de eindige elementen methode werd gedeeld door de plastische weerstand om tot een dimensieloze bezwijklast te komen. Per boog kon zo de dimensieloze bezwijklast worden uitgezet tegen de slankheid. De eindige elementen resultaten werden geplot in de knikkromme zoals beschreven in de NEN 6770. Hieruit werd geconcludeerd dat met behulp van knikkromme a, zoals beschreven in de NEN 6770 en de Eurocode 3 (NEN-EN 1993-1-1), de draagkracht van een boog voor knik uit het vlak kan worden getoetst.

4.2 Verticale belasting

Bogen in uniforme buiging of uniforme druk [1] vormden slechts een eerste aanzet naar de ontwikkeling van rekenregels. Het ligt in de lijn der verwachting dat voor bogen onder verticale belasting waarbij buiging en axiale druk beiden een belangrijke rol spelen eenzelfde methodiek kan worden gevolgd. Een eerste voorstel voor het gebruik van knikkrommen voor de toetsing van de stabiliteit uit het vlak voor verticale belasting werd voorgesteld in [3] op basis van het werk in [2]. Voor een boog belast door een puntlast in de top kan de draagkracht als volgt worden getoetst:

$$\frac{F}{\chi F_{pl}} \leq 1$$

Waarbij χ de reductiefactor is volgens een nader te bepalen knikkromme als functie van de dimensieloze slankheid.

De dimensieloze slankheid kan worden bepaald als volgt

$$\bar{\lambda} = \sqrt{F_{pl} / F_{cr}}$$

Hierin zijn

F_{pl} de plastische bezwijklast voor een boog onder een puntlast.

F_{cr} de elastische kritieke kniklast voor een boog onder een puntlast.

Experimentele en numerieke resultaten in [2] werden vergeleken met knikkromme a en knikkromme d. Op basis van deze vergelijking en de kleine verschillen tussen experimentele en numerieke resultaten werd uiteindelijk knikkromme b voorgesteld voor het toetsen van de stabiliteit van bogen onder verticale belasting [3].

4.3 Inleidende parameterstudie

Hoewel het gebruik van knikkrommen is gerechtvaardigd voor het bepalen van de draagkracht van bogen [3], werd als onderdeel van het huidige onderzoek een uitgebreide eindige elementen studie uitgevoerd, die dient als supplement op het eerdere werk [3] om met meer zekerheid het gebruik van knikkrommen te rechtvaardigen. Het eindige elementen model werd opgezet met een vereenvoudigde aanname betreffende de mechanische eigenschappen en restspanningen. De invloed van het buigproces werd nog niet in rekening gebracht. Het gebruikte eindige elementenprogramma is ANSYS release 11.0.

4.3.1 Elastisch-plastische knikberekeningen

Eindige elementen model

Het eindige elementen model voor het uitvoeren van de inleidende parameterstudie (afbeelding 14) is opgebouwd uit schaalementen. Er zijn 8 schaalementen toegepast over de breedte van de flens en de hoogte van het lijf. In de lengte richting van de boog zijn 96 elementen toegepast, wat een totaal van 2304 schaalementen geeft. Er is gekozen voor 4-knoops schaalementen (SHELL181). Om lokale spanningsconcentraties ter plaatse van de belastinginleiding en de oplegging te voorkomen zijn constraint-elementen toegepast (MPC184). Afrondingstralen van het profiel zijn niet gemodelleerd.

Randvoorwaarden en belastingen

De translatie ter plaatse van de opleggingen in x, y, z-richting is verhinderd. De rotaties om de x en y-richting zijn verhinderd (inklemming), echter de rotatie om de z-as is vrij. Welving is verhinderd bij de opleggingen. De bogen zijn belast door een centrale puntlast in de top of een uniform verdeelde verticale belasting over de lengte van de boog.

Materiaalmodel

De gebruikte staalsoort in de eindige elementen analyses is S235 of S355 met een vloeigrens van respectievelijk 235 N/mm² of 355 N/mm². De elasticiteitsmodulus is gelijk aan 200 000 N/mm², gebaseerd op vergelijkbare parameters in internationaal onderzoek. De plasticiteit van het materiaal wordt gekarakteriseerd door het Von Mises vloeicriterium, de Prandl-Reuss vloeiregel en een isotrope hardeningswet.

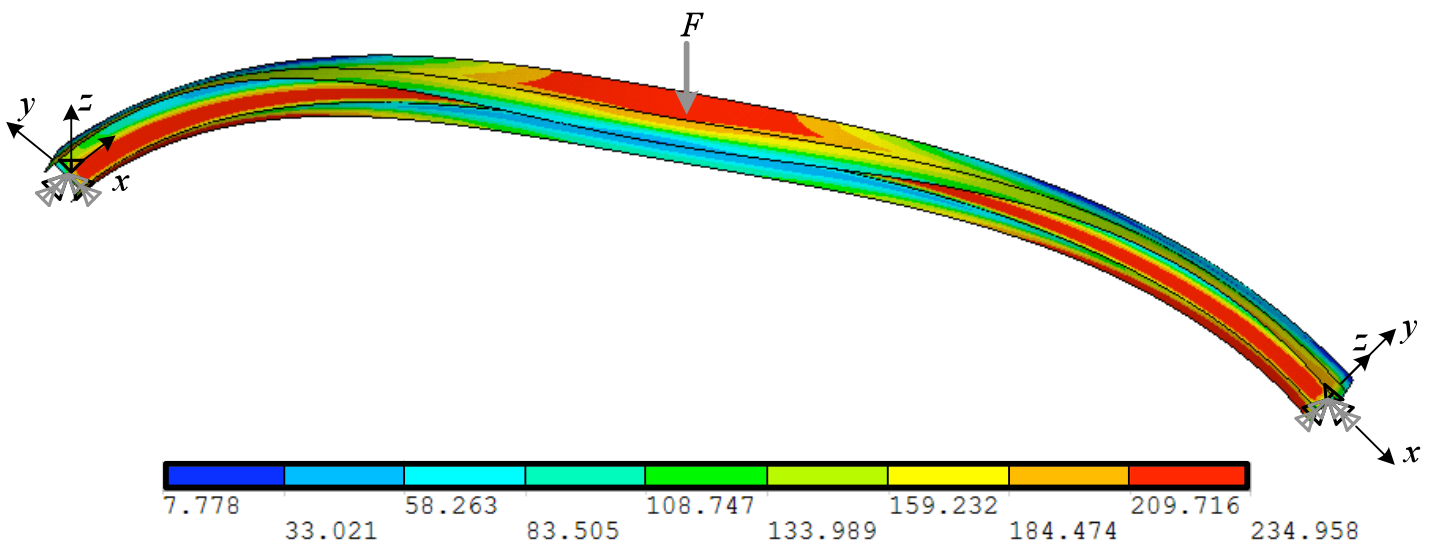
Imperfecties

Imperfecties kunnen worden onderverdeeld in geometrische imperfecties (scheefstand) en restspanningen. In de inleidende parameterstudie werd voor de geometrische imperfecties de knikvorm van de 1^e eigenwaarde gebruikt. De grootte of amplitude van de imperfecties werd gelijk gesteld aan $S/1000$, waarbij S de booglengte is. Voor de restspanningen werd een eenvoudig patroon geïmplementeerd gebaseerd op het restspanningspatroon dat ontstaat tengevolge van het ongelijkmatig afkoelen van I-profielen.

Oplosprocedures

Evenwicht is geformuleerd in de vervormde toestand van de constructie en het materiaal heeft een niet-lineaire respons die een Geometrisch Materiaal Niet-lineaire Analyse met Imperfecties (afgekort: GMNIA) vereist. Aangezien er een niet-lineair verband is tussen kracht en vervorming worden de evenwichtsvergelijkingen iteratief opgelost met het zogenaamde Newton-Raphson algoritme. De maximale belasting gevonden in de eindige elementen analyse is de bezwijklast.

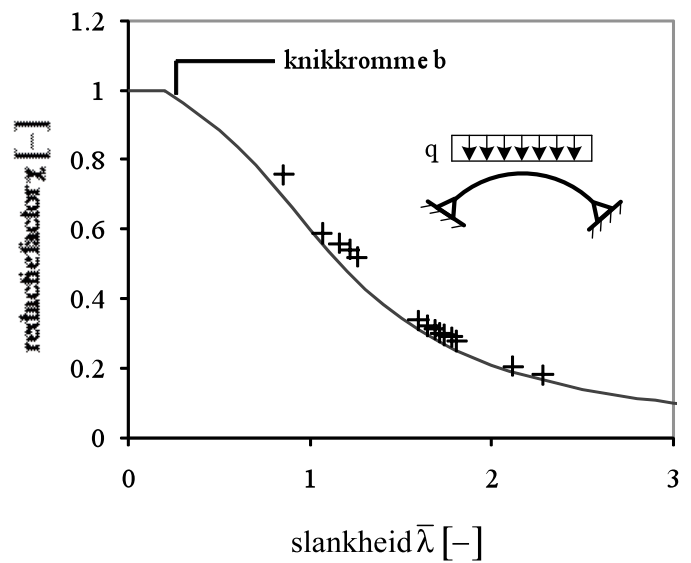
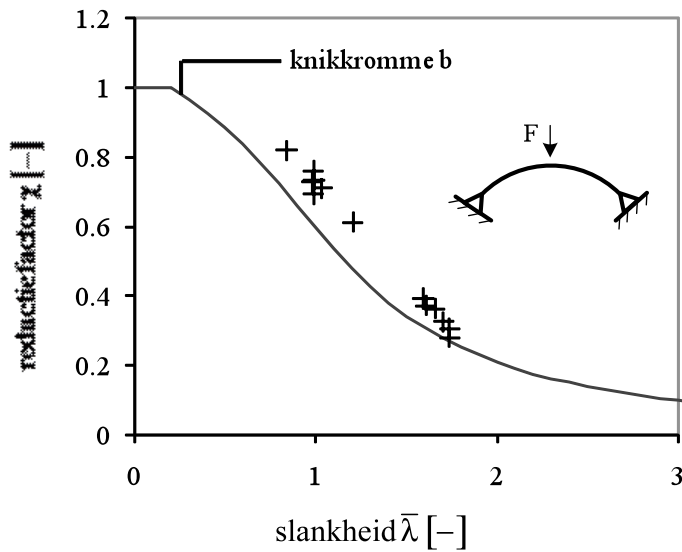
Twee aanvullende berekeningen worden gemaakt voor dezelfde geometrie. Een eigenwaarde berekening en een 1^e orde plastische berekening om respectievelijk de elastische kritieke kniklast te bepalen en de plastische weerstand in het vlak. Hiermee kan uiteindelijk de dimensieloze slankheid en de reductiefactor worden bepaald, wat een vergelijking mogelijk maakt met de knikkromme.



14. Von Mises vergelijkingsspanningen tijdens knik van een boog bij de maximale belasting. Eindige elementen berekening van een HE 100A in ANSYS v. 11.0.

4.3.2 Vergelijking met knikkromme

Voor een groot aantal bogen met verschillende doorsneden, belastinggevallen en geometrieën is de dimensieloze draagkracht berekend en uitgezet tegen de berekende slankheid. Per boog werd het resultaat van de eindige elementen vergeleken met knikkromme b (afbeelding 15).



15. Knikkromme b met eindige elementen resultaten, voor een boog met een puntlast in het midden (links) en een boog onder een verticale uniforme belasting (rechts).

Eindige elementen resultaten bevestigen eerdere resultaten [3] in zoverre dat een knikkromme kan worden gebruikt voor cirkelvormige bogen voor knik uit het vlak. Echter, deze eindige elementen simulaties waren nog niet uitgerust met de juiste mechanische eigenschappen en restspanningen zoals gevonden in de eerste fase van het onderzoek. Een verdere verfijning van de invoerparameters voor de numerieke analyses is daardoor nodig om tot een definitieve keuze van een knikkromme te komen.

5 Conclusies

Dit artikel geeft een beknopt overzicht van het huidige onderzoek naar knikstabiliteit van bogen op de Technische Universiteit Eindhoven. De invloed van het profielbuigproces op de constructieve eigenschappen van I-profielen is geïllustreerd met meetresultaten en eindige elementen analyses. Het is duidelijk dat het profielbuigproces een significante invloed heeft op de eigenschappen van het balkstaal. Een nieuw restspanningspatroon wordt gevormd dat verschilt met het restspanningspatroon in rechte I-profielen. Dit resultaat werd bevestigd door eindige elementen berekeningen van het profielbuigproces. Trekproeven uitgevoerd op proefstaven uit recht warmgewalst staal en koudgebogen staal wezen uit dat een aanmerkelijke verandering in vloeisterkte en treksterkte werd gevonden na het buigen. De taaiheid van het materiaal nam af. Hiermee werd duidelijk dat koudgebogen balkstaal en recht balkstaal niet dezelfde eigenschappen hebben en dit dient ook te worden geïmplementeerd in toekomstige rekenregels. Eerder onderzoek en een inleidende parameterstudie wezen uit dat de huidige knikkrommen kunnen worden gebruikt voor het bepalen van de draagkracht van bogen. Onafhankelijk van de profielgrootte, oplegcondities, belastingen en boogafmetingen kan één enkele knikkromme volstaan.

6 Vervolgonderzoek

De voorgaande paragrafen laten zien dat tot dusverre alleen de invloed van het buigproces op de eigenschappen van bogen en een eerste aanzet tot de rekenregel voor het bepalen van de kniklast van vrijstaande bogen zijn bepaald. Deze twee tussenresultaten dienen te worden gecombineerd om tot een uiteindelijke knikkromme te komen voor koudgebogen I-profielen toegepast als vrijstaande cirkelvormige bogen waarmee de stabiliteit uit het vlak kan worden getoetst. Deze knikkromme zal worden bepaald op basis van een uitgebreide parameterstudie met behulp van de eindige elementen methode. De laatste fase van het onderzoek omvat het afleiden van formules voor het bepalen van de elastische kniklast en de plastische weerstand van bogen, waarvoor in het laatste geval al een eerste aanzet is gegeven in [9]. Met dit zogenaamde ‘ingenieursgereedschap’ kan een ontwerpend constructeur eenvoudig de dimensieloze slankheid van bogen uit het vlak bepalen waarmee hij/zij vervolgens de stabiliteit uit het vlak kan toetsen. De uiteindelijke knikkromme en de bijbehorende formules voor de dimensieloze slankheid zullen later worden gepubliceerd in Bouwen met Staal. Wanneer eenmaal de formules voor de slankheid zijn bepaald en de juiste knikkromme is afgeleid kan de berekeningsmethodiek ook worden geëxtrapoleerd naar bogen uitgerust met één of meerdere zijdelingse steunen, een constructie die meer voorkomt dan de vrijstaande boog.

7 Dankwoord

Dit onderzoek werd uitgevoerd onder projectnummer MC1.06262 als onderdeel van het onderzoeksprogramma van het Materials innovation institute M2i (www.m2i.nl). Het onderzoek werd mede mogelijk gemaakt door financiële steun van Bouwen met Staal en de StaalFederatie Nederland (SFN). Een groot deel van de experimenten werd voorbereid en uitgevoerd door T.J. van de Loo en H.L.M. Wijen van het Pieter van Musschenbroek laboratorium aan de Faculteit Bouwkunde van de Technische Universiteit Eindhoven waarvoor de auteurs zeer dankbaar zijn. Het constructiestaal voor de experimenten werd kosteloos geleverd en gebogen door respectievelijk Deltastaal BV en Kersten Europe BV.

8 Referenties

1. S.F. Delrue, H.H. Snijder, F.S.K. Bijlaard en H.M.G.M. Steenbergen, Toetsingsregels voor stalen bogen (2), Bouwen met Staal, 148, 1999, p. 54-57.
2. D.B. La Poutre, Inelastic Spatial Stability of circular wide flange steel arches, Ph.D.-thesis Technische Universiteit Eindhoven, 2004.
3. R. Ziemian, Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures, 2010, Sixth Edition.
4. R.C. Spoorenberg, H.H. Snijder, J.C.D. Hoenderkamp, Experimental investigation of residual stresses in roller bent wide flange steel sections, Journal of Constructional Steel Research, 66(6), 2010, p. 737-747.
5. R.C. Spoorenberg, H.H. Snijder, J.C.D. Hoenderkamp, Finite element simulations of residual stresses in roller bent wide flange sections, Journal of Constructional Steel Research, 67(1), 2011, p. 39-50.
6. R.C. Spoorenberg, H.H. Snijder, J.C.D. Hoenderkamp, M.C.M. Bakker, Residual stresses in cold bent HE 100A steel arches, In Proceedings of the Nordic Steel Construction Conference (NSCC), 2009, p. 414-421.
7. R.C. Spoorenberg, H.H. Snijder, J.C.D. Hoenderkamp, Residual stress measurements in roller bent HE 100B sections, In Proceedings of the International Colloquium Stability and Ductility of Steel Structures (SDSS), 2010, p. 579-586.
8. R.C. Spoorenberg, H.H. Snijder, J.C.D. Hoenderkamp, M.C.M. Bakker, Cold forming hot-rolled wide flange beams into arches – preliminary finite element simulations, In Proceedings of 5th Eurosteel Conference, 2008, p. 1837-1842.
9. M.C.M. Bakker, R.C. Spoorenberg, H.H. Snijder, J.C.D. Hoenderkamp, In-plane plastic limit load of steel circular arches – a lower bound limit analysis approach, In Proceedings of 5th Eurosteel Conference, 2008, p. 1831-1836.