

EINDRAPPORT NIL-CS-ONDERZOEK
CONSTRUCTIEVE ASPECTEN
HOGE REKGRENS STAAL S 460

December 1993

Ir. A.M. Gresnigt

Opdrachtgever:

Nederlands Instituut voor Lastechniek
Postbus 541
7300 AM Apeldoorn.

Key words:

High strength steel
S 460
Annex D Eurocode 3

TU-Delft

Technische Universiteit Delft
Faculteit der Civiele Techniek
Stevin Laboratorium - Staalconstructies
Postbus 5049, 2600 GA Delft
Telefoon: 015-783729 en 783382
Telefax: 015-782308 en 611465

VOORWOORD

In the final version of this report, the Nederlands Instituut voor Lastechniek will write a note on the organisation of the project, the participants and the sponsors.

INHOUD	Blz.
1. INLEIDING, DOELSTELLING VAN HET ONDERZOEK	1
2. UITVOERING, RESULTATEN	2
2.1 Algemeen	2
2.2 Hoeklassen	3
2.3 Niet verstijfde gelaste verbindingen	5
2.4 Geboute verbindingen in strippen en hoekstalen	8
2.5 Geboute balk-kolom verbindingen	8
2.6 Buisconstructies	9
2.7 Stabiliteitsgedrag van profielen (plooien, knikken)	9
3. RICHTLIJNEN VOOR HET CONSTRUEREN IN HRS	11
4. AFSLUITENDE OPMERKINGEN	14
5. AANBEVELINGEN VOOR VERDER ONDERZOEK	15
6. RAPPORTEN, PUBLICATIES, REFERENTIES, DOCUMENTENLIJST	16
6.1 Uitgebrachte rapporten	16
6.2 Publicaties	16
6.3 Referenties	17
6.4 Documentenlijst	18

Bijlage: Annex D van Eurocode 3: The use of steel grades S 460 and S 420 (versie 14 juli 1993)

1. INLEIDING, DOELSTELLING VAN HET ONDERZOEK

De belangstelling in West Europa en ook in Nederland voor het toepassen van constructie-staalsoorten met een hoge rekgrens (vloei-grens) en treksterkte, zogenaamde hoge rekgrens staal-soorten (HRS), is de laatste jaren sterk toegenomen. Deze toegenomen belangstelling houdt verband met de economische voordelen (kostenbesparingen) die het gebruik van HRS bij de fabricage en/of bij het gebruik van de constructie kan opleveren.

Bij constructies voor civiele doeleinden zijn voorbeelden te vinden bij de bouw van offshore platforms, bruggen en gebouwen. De voordelen spelen vooral een rol bij de grotere constructies (veel staal) en bij constructies waar beperking van het eigen gewicht een belangrijke invloed heeft op de optredende krachten, zoals bij grote overspanningen.

De belangstelling voor het toepassen van HRS wordt gestimuleerd door het beschikbaar komen van moderne goed lasbare staal-soorten. Echter, voor het daadwerkelijk construeren in HRS zijn ook eenvoudige en goed hanteerbare richtlijnen voor ontwerp en berekening nodig. Het ontbreken daarvan voor staal-soorten met een hogere sterkte dan S 355 vormde de aanleiding voor het onderzoek "HRS - Constructieve Aspecten".

De doelstelling van het onderzoek was dan ook als volgt geformuleerd:

- Het doen van aanbevelingen voor ontwerprichtlijnen en rekenregels voor het construeren in hoge rekgrens staal, in het bijzonder S 460. Deze aanbevelingen moeten er toe leiden dat het toepassingsgebied van de TGB 1990 Staalconstructies (NEN 6770 en volgende) wordt uitgebreid tot en met S 460. Thans is het toepassingsgebied beperkt tot staal-constructies uit staal-soorten tot maximaal S 355.
- Het bekend maken van de constructeurs en gebruikers met de voordelen die het toepassen van HRS kan bieden, en het geven van aanwijzingen voor het ontwerpen van constructies in HRS.

In dit eindrapport wordt een samenvatting gegeven het uitgevoerde onderzoek "Constructieve Aspecten" en van de belangrijkste resultaten van dit deelonderzoek. Voor een overzicht van de andere deelonderzoeken (Verwerkbaarheid en Pijpleidingen) wordt verwezen naar de desbetreffende rapporten [1.8, 1.9].

2. UITVOERING, RESULTATEN

2.1 Algemeen

In het werkprogramma "Constructieve Aspecten" (NIL-HRS 89-03) is een omschrijving gegeven van het voorgestelde onderzoek. Omdat de beschikbare financiële middelen niet toereikend bleken om het gehele voorgestelde onderzoekprogramma uit te voeren, is in overleg met de Stuurgroep besloten het werk te concentreren op het opstellen van richtlijnen voor alle relevante gebieden voor S 460 en het uitvoeren van experimenteel onderzoek en eindige elementenberekeningen te beperken (zie NIL-HRS 89-09 c.q. het werkgoepdocument HRS-WG-CA-89-01 in par. 6.4).

Bestaande richtlijnen voor ontwerp en berekening van staalconstructies hebben in het algemeen een begrenzing van het toepassingsgebied tot staalsoorten met een nominale sterkte overeenkomend met S 355. De reden is dat hogere rekgrens staalsoorten andere mechanische eigenschappen hebben dan de vanouds bekende staalsoorten t/m S 355. De hogere sterkte, de lagere treksterkte/vloeigrens verhouding (f_t/f_y) en de andere taaiheidseigenschappen leiden er toe dat bestaande regels voor ontwerp en berekening niet zonder meer mogen worden toegepast voor HRS.

De belangstelling voor het toepassen van hoge rekgrens staal is internationaal. Op veel plaatsen in de wereld is en wordt onderzoek uitgevoerd aan HRS. In het kader daarvan wordt tevens gewerkt aan het ontwikkelen van voorschriften. In Europees verband betreft dit de ontwikkeling van Annex D bij Eurocode 3: The use of steel grades S 460 and S 420. Verwacht wordt dat deze annex eind 1993 of begin 1994 zal worden gepubliceerd. De laatste versie is als bijlage 1 in dit eindrapport opgenomen.

Deze annex D zal ook in Nederland toegepast kunnen worden. Om de aansluiting met de Nederlandse belastingsvoorschriften (NEN 6702) tot stand te brengen wordt in de normcommissie 351 01 02 "TGB - Staalconstructies" gewerkt aan een "National Application Document".

Gedurende de looptijd van dit NIL onderzoek zijn de ontwikkelingen op het Europese vlak nauwlettend gevolgd. Verschillende keren zijn voorstellen ingediend voor aanpassing van eerdere versies van Annex D:

- Via ECCS-TC10: "Structural Connections", waar prof.ir. J.W.B. Stark voorzitter is (tevens voorzitter TGB-Staalconstructies) en waar ir. A.M. Gresnigt secretaris is en

voorzitter van werkgroep TWG 10.5 High Strength Steel and Welding. In ECCS-TC10 is een aantal leden tevens lid van CEN/TC250 Sc 3. CEN/TC250 Sc 3 is verantwoordelijk voor Eurocode 3 en Annex D.

- Via de Nederlandse vertegenwoordiging in CEN/TC250 Sc3, ingediend via het NNI.

Het eerste contact is meer informeel; het tweede is formeel.

Annex D betreft het ontwerp en de berekening van constructies in S 420 en S 460. In deze annex zijn alleen regels opgenomen voor zover deze afwijken van de regels in Eurocode 3 (het hoofddocument).

In CEN/TC135 wordt gewerkt aan regels voor de uitvoering van staalconstructies. Onlangs is een eerste concept verspreid betreffende S 420 en S 460: Draft prEN 1090-3 Execution of steel structures - Part 3: Supplementary rules for the use of high strength steels [3.3].

Van Nederlandse zijde zal de verdere ontwikkeling nauwlettend worden gevolgd, waarbij uiteraard dankbaar gebruik zal kunnen worden gemaakt van de resultaten van het NIL-deelproject "Verwerkbaarheid". Ook deze "supplementary rules" zullen t.z.t. door Nederland worden overgenomen.

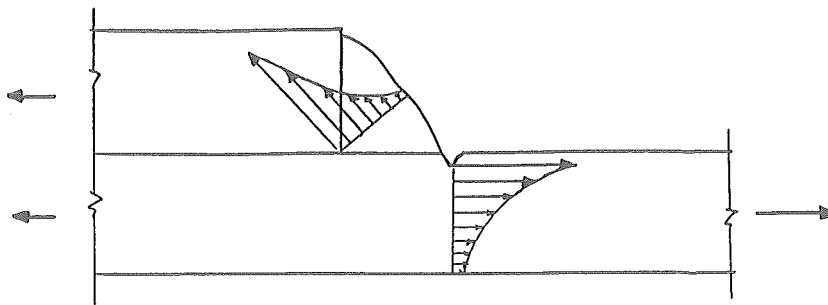
Onderstaand volgt een overzicht van het uitgevoerde onderzoek en de belangrijkste resultaten. Voor gedetailleerde gegevens wordt verwezen naar de rapporten en de uitgebrachte publicaties in par. 6.1 en 6.2. In hoofdstuk 3 zijn enige richtlijnen opgenomen betreffende de materiaalkeuze en de vormgeving van constructies in HRS. Zie ook het VM-blad 84 [2.7].

2.2 Hoeklassen

Het doel van dit gedeelte was het opstellen van ontwerp- en rekenregels voor de sterkte en vervormingscapaciteit van kophoeklassen en zijhoeklassen als functie van de eigenschappen van het basismateriaal en het lastoevoegmateriaal.

Naast een voldoende sterkte van het neergesmolten lasmateriaal is vooral de taaheid van groot belang. Immers, door de geometrie treden lokaal grote spanningsconcentraties c.q. rekconcentraties op, zie figuur 2.1.

Als de taaheid niet voldoende is om over de gehele doorsnede een zodanige herverdeling van spanningen te krijgen dat overal de treksterkte wordt bereikt, dan zal de onvoldoende taaheid (het vermogen om plastische rekken op te nemen), de sterkte van de lasverbinding negatief beïnvloeden. Variaties in taaheidseigenschappen vormen een belangrijke oorzaak voor de grote variatie in proefresultaten op hoeklasverbindingen, zie bijvoorbeeld [2.5].



Figuur 2.1: Spanningsconcentraties c.q. rekconcentraties in een hoeklas ter plaatse van de wortel en ter plaatse van een inkarteling.

Bij hoge rekgrens staal speelt voorts de verhouding van de sterkte van het lasmateriaal ten opzichte van de sterkte van het plaatmateriaal een rol. Bij lagere sterkte toevoegmateriaal zal in het algemeen de taatheid van het lasmetaal groter zijn, dan wanneer hogere sterkte toevoegmateriaal wordt gebruikt. De geringere sterkte kan bij de in civiele constructies zeer veelvuldig toegepaste hoeklas- en K-las verbindingen eenvoudig worden gecompenseerd door de dikte van de las aan te passen. In deze situaties zou dus "undermatched" lasmetaal kunnen worden toegepast; dat wil zeggen lasmetaal waarbij de vloeigrens lager is dan van het plaatmateriaal.

Eindige elementen berekeningen [1.2] hebben echter laten zien dat bij normaal "overmatched" lasmetaal de plastische rekken voornamelijk in het naastliggende zachtere (taaiere) plaatmateriaal optreden, terwijl bij "undermatched" lasmetaal de rekken zich in het zachtere lasmetaal concentreren. Hierdoor wordt het voordeel van het zachtere lasmetaal dus weer gedeeltelijk teniet gedaan.

In annex D van Eurocode 3, wordt in D.3.2 het volgende geëist: "The specified yield strength, ultimate tensile strength, elongation at failure and minimum Charpy V-notch energy value of the filler metal shall be either equal or better than the corresponding values specified for the steel grade being welded", zie bijlage 1. Hierbij wordt opgemerkt dat door variaties in de werkelijke sterkte- en taatheidseigenschappen het niet gegarandeerd is dat altijd overmatched lasmetaal aanwezig is. Zie ook het eindrapport van het deelproject verwerkbaarheid [1.8].

Uit de uitgevoerde inventarisatie van proefresultaten en berekeningsmethoden is gebleken dat voor de ontwerpsterkte verschillende formuleringen worden gehanteerd. Zo wordt in Eurocode 3 en Annex D uitgegaan van de treksterkte van het plaatmateriaal, waarbij de relatie naar de sterkte van het lasmetaal via de β -factor tot stand komt. Voor S 235 is $\beta = 0,80$; voor S 355 is $\beta = 0,90$ en voor S 460 is $\beta = 1,00$. Bij hoge rekgrens staal is het verschil

in sterkte lasmetaal, sterkte plaatmateriaal kleiner; dit verklaart het verschil in β -factor.

$$\sigma_{w;s;d} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \tau_{\perp}^2 + 3 \tau_{//}^2} \leq \frac{f_{t;d}}{\beta \gamma_M}$$

De Zweedse voorschriften [3.14] brengen de sterkte van het lasmetaal meer expliciet in rekening.

$$\sigma_{w;s;d} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \tau_{\perp}^2 + 3 \tau_{//}^2} \leq \frac{(f_{t,plaat} + f_{t,lasmetaal}) / 2}{1,2 \gamma_n}$$

In bovenstaande formules zijn γ_M en γ_n veiligheidsfactoren; $f_{t;d}$ is de "design"-waarde voor de treksterkte van het plaatmateriaal.

Uit vergelijkende berekeningen [3.13] is gebleken dat de Zweedse methode beter aansluit bij de proefresultaten. Een voorstel om deze berekeningsmethode over te nemen in Eurocode 3 en Annex D is echter niet overgenomen, omdat bij de grote hoeveelheid proefresultaten ter verificatie van de berekeningsformules wel $f_{t,plaat}$ bekend was, maar in het algemeen niet $f_{t,lasmetaal}$. Verder speelde de "natuurlijke weerstand" tegen het verlaten van een beproefd en vertrouwd concept een rol.

Ten aanzien van de aanvaardbaarheid van lasfouten zijn in het kader van dit NIL-onderzoek geen activiteiten ontplooid. Zie hoofdstuk 5 over aanbevelingen voor verder onderzoek.

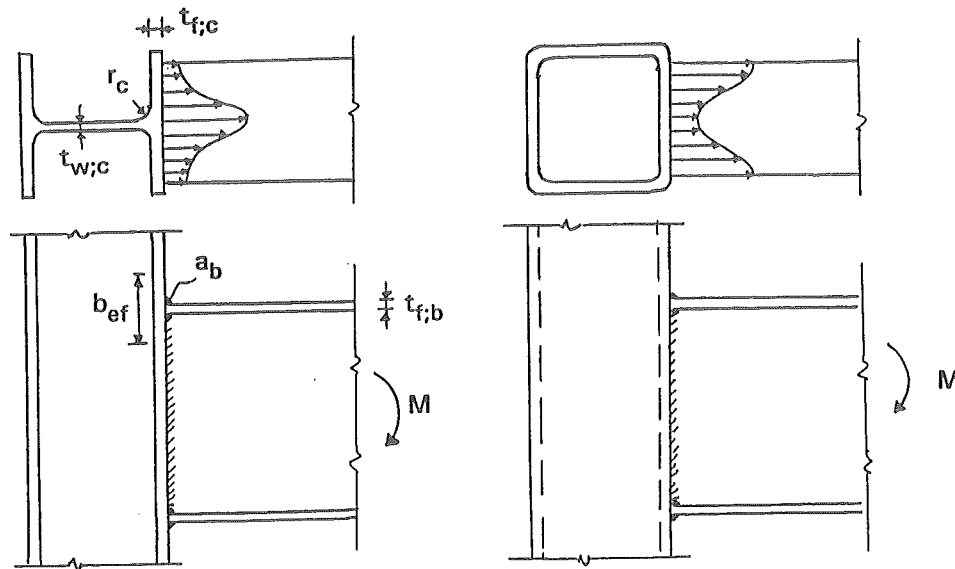
Voor de uiteindelijke rekenregels en verdere informatie wordt verwezen naar Annex D in de bijlage, naar het deelrapport [1.2] en naar de uitgebrachte publicaties [2,1], [2.2].

2.3 Niet verstijfde gelaste verbindingen

Het doel van dit deel van het onderzoek was na te gaan in hoeverre de beschikbare ontwerp- en rekenregels ook mogen worden toegepast voor S 460. Het betreft hier balk-kolom verbindingen zoals aangegeven in figuur 2.2.

Bij de in figuur 2.2 getekende verbindingen zijn verschillende bezwijkvormen mogelijk. Elk van deze bezwijkvormen moet worden geanalyseerd om de sterkte, stijfheid en taaiheid (rotatiecapaciteit) van de verbinding te kunnen bepalen. Doordat bij HRS in het algemeen slanker zal worden geconstrueerd (dunnere lijven en flenzen in gewalste profielen) en door de hogere sterkte alsmede de kleinere f_t/f_y verhouding zijn de ontwerp- en rekenregels voor "conventioneel staal" niet zonder meer geldig voor S 460. Aanpassingen zijn nodig.

In het onderzoek is een inventarisatie gemaakt van de beschikbare rekenmodellen, zie het "State of the art" report [1.3]. Vervolgens zijn deze rekenmodellen vergeleken met een groot aantal proefresultaten [1.4, 1.5, 1.6].



Figuur 2.2: Onverstijfde gelaste balk-kolom verbindingen.

Voor de controle van het kolomlijf in de trekzone is een theoretisch beter onderbouwde formule ontwikkeld, waarmee een betere aansluiting bij de proefresultaten mogelijk is [1.3]. De huidige formule voor de trekcapaciteit in het kolomlijf $F_{t;d}$ luidt als volgt:

$$F_{t;d} = f_{y;c;d} \cdot t_{w;c} \cdot b_{ef}$$

Voor walsprofielen is de effectieve breedte b_{ef} :

$$b_{ef} = t_{f;b} + 2\sqrt{2} a_b + 5(t_{f;c} + r_c)$$

Hierin is $f_{y;c;d}$ de vloeigrens in de kolom; $t_{w;c}$ de dikte van het kolomlijf; $t_{f;b}$ de dikte van de liggerflens; a_b de lasdikte; $t_{f;c}$ de dikte van de kolomflens en r_c de afrondingsstraal van de kolom.

Met behulp van de vloeilijmentheorie is voor b_{ef} de volgende formule ontwikkeld:

$$b_{ef} = t_{f;b} + 2\sqrt{2} a_b + 5(t_{f;c} \cdot f_1 + r_c \cdot f_2) \cdot f_4$$

met:

$$f_1 = 0,4 \cdot \sqrt{\frac{b_{f;c}}{t_{w;c}}} \cdot \sqrt{f_3}$$

$$f_4 = \frac{t_{f;c} + r_c}{t_{f;c} \cdot f_1 + r_c \cdot f_2}$$

en:

profiel	f_2	f_3
HEA	0,164	1,10
HEB	0,159	1,08
HEM	0,162	1,05
IPE	0,176	1,12
INP	0,169	1,06
De hier gegeven waarden voor f_2 en f_3 zijn vereenvoudigingen van de in [1.3] afgeleide formules.		

Voor veel gebruikte kolom-profielen als HEA 200 tot HEA 400 zijn de verschillen niet erg groot. Dit is te verklaren uit het feit dat de huidige formule in hoge mate empirisch is op basis van proeven waarbij HEA-profielen zijn gebruikt. Voor profielen waarbij de verhouding tussen de afrondingsstraal en de flensdikte anders ligt, kunnen er grotere verschillen optreden. Dit is met name ook van belang voor HRS, omdat daar de neiging bestaat dunwandiger profielen toe te passen. Samen met de hogere spanningen kan dit er toe leiden dat de trekzone van het kolomlijf eerder maatgevend is.

Het voorgaande is ingebracht in ECCS-TC10 "Structural Connections" en vormt verder een van de documenten bij de herziening van Annex J "Beam-to-column connections" van Eurocode 3, en te zijner tijd bij een soortgelijke herziening van NEN 6772 [3.7].

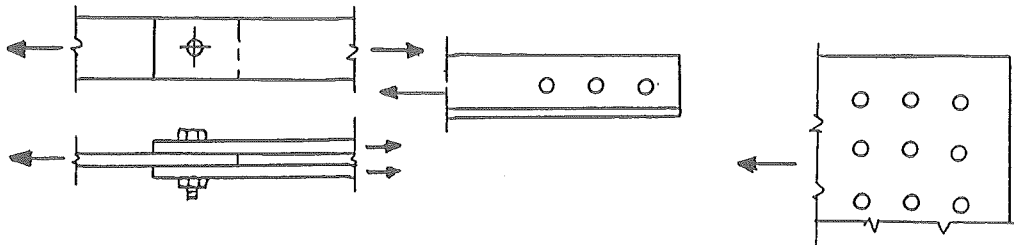
De neiging tot dunwandiger profielen in HRS en de grotere optredende spanningen leiden er ook toe dat plooien (in de gedrukte zone) eerder maatgevend is. Het onderzoek heeft geleid tot de aanbeveling de oorspronkelijk in Annex D voorgestelde formule voor de plooisterkte in de gedrukte zone aan te passen, zie [1.5] en doc. CA-93-51. Dit voorstel is overgenomen door CEN/TC135 Sc3, zie annex D in de bijlage bij dit rapport.

Uit ervaringen elders en ook in dit onderzoek is gebleken dat het wenselijk is om de bestaande regels voor balk-kolom verbindingen aan te passen. Enige tijd geleden heeft CEN/TC250 Sc3 besloten om Annex J van Eurocode 3, waarin niet verstijfde gelaste en geboute balk-kolom verbindingen worden behandeld, te wijzigen. De resultaten van het NIL-onderzoek worden daarin meegenomen. Zie ook doc. CA-93-54.

Voor verdere details over dit deelonderzoek wordt verwezen naar de verschillende deelrapporten [1.3], [1.4], [1.5], [1.6] en naar de publicatie [2.2].

2.4 Geboute verbindingen in strippen en hoekstalen

Het doel van dit deel van het onderzoek was na te gaan of de beschikbare ontwerp- en rekenregels ook mogen worden toegepast voor S 460.



Figuur 2.3: Geboute verbindingen in strippen, hoekstalen en platen.

In een Europees onderzoekprogramma, gesponsord door ARBED, zijn in Duitsland en Engeland uitgebreide proevenseries op dit type verbindingen uitgevoerd [3.16, 3.17, 3.20]. Gebleken is dat de bestaande regels in Eurocode 3 ook voor S 460 mogen worden toegepast. In het NIL-HRS onderzoek is daarom aan dit onderwerp verder geen aandacht besteed. Hierdoor kon meer tijd worden vrijgemaakt voor met name het onder 2.3 beschreven onderzoek aan gelaste niet verstijfde verbindingen en aan het onderwerp stabiliteit in par. 2.7.

2.5 Geboute balk-kolom verbindingen

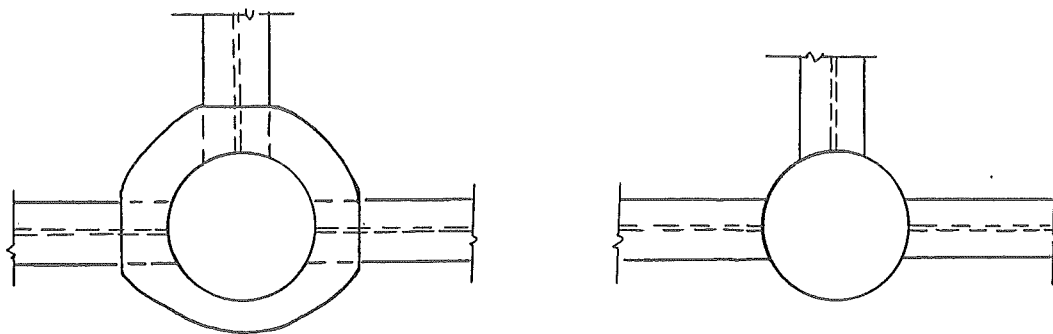
De doelstelling hier was dezelfde als bij de gelaste balk-kolom verbindingen in de vorige paragraaf. Mannesmann (ir. P. Zoetemeijer) heeft de bestaande rekenmodellen geëvalueerd zoals gepubliceerd in Annex J van Eurocode 3 (en in NEN 6772). Naar aanleiding daarvan zijn vragen gerezen over de vervormingscapaciteit van het zogenoemde T-stuk indien S 460 wordt toegepast met de bijbehorende lagere f_t/f_y verhouding. Een voorstel voor het uitvoeren van twee proeven is uitgebracht (doc. CA-92-35). Aan ARBED is om proefmateriaal gevraagd. De levering heeft echter vertraging opgelopen, zodat dit deel van het onderzoek nog niet gereed is.

De resultaten zullen worden ingebracht bij de eerder vermelde herziening van Annex J en zonodig ook bij de CEN commissie die verantwoordelijk is voor Annex D.

Tenslotte wordt melding gemaakt van het afstudeeronderzoek van een student (P. Bassie) dat thans bij TNO-Bouw wordt uitgevoerd. In dit afstudeeronderzoek wordt het gedrag van een T-stuk met behulp van eindige elementenberekeningen (DIANA) onderzocht. In de uitvoerende parameterstudies wordt ook de verhouding f_t/f_y meegenomen.

2.6 Buisconstructies

In verband met de beschikbare financiële middelen (zie punt 2.1 Algemeen) is afgezien van eigen onderzoek op dit gebied. Aan belanghebbenden in de stuurgroep is toegezegd dat zij zullen worden geïnformeerd over verschillende onderzoekprogramma's op dit gebied die bij de TU-D worden uitgevoerd (CIDECT en ECSC). In het bijzonder bestaat er belangstelling voor verbindingen tussen I-vormige balken en kolommen uit ronde buis.



Figuur 2.4: Verstijfde en niet verstijfde verbinding.

De ringvormige verstijfde verbinding wordt veelvuldig in offshore dekconstructies toegepast. Dit type van verstijvingen is erg kostbaar. In de hiervoor genoemde onderzoekprogramma's worden ontwerp- en rekenregels opgesteld voor het bepalen van de sterkte, de stijfheid en de vervormingscapaciteit van niet verstijfde verbindingen, zoals aangegeven in figuur 2.4.

2.7 Stabiliteitsgedrag van profielen (plooien, knikken)

De knikspanning en de plooi spanning zijn afhankelijk van de geometrie, van de materiaaleigenschappen, van geometrische afwijkingen (bijvoorbeeld een niet rechte kolom) en van de grootte van de restspanningen.

Gunstig bij HRS is dat de restspanningen in walsprofielen (I en HE) relatief lager zijn dan bij lagere rekgrens staal ($\sigma_{rest}/\sigma_{vloei}$ is lager; de absolute waarde van de restspanningen niet). Hierdoor wordt met name de knikstabiliteit gunstig beïnvloed. Bij de uitgevoerde knikproeven (voornamelijk in Duitsland op door ARBED geleverde balken, zie het background document D.05 [3.20] en het rapport van dr. Puthli [1.7]), is gebleken dat de knikstabiliteit van de beproefde kolommen beter is dan van kolommen in lagere rekgrens staal. Een en ander heeft geleid tot hogere knikkrommen voor S 460 in Annex D, zie de bijlage bij dit rapport.

In het NIL-HRS onderzoek is gebleken dat de in Annex D voorgestelde knikkrommen in een paar gevallen een aantal procenten "te optimistisch" zijn (de statistische evaluatie, zie het rapport van dr. Puthli [1.7]). Verder heeft het feit dat bij de proeven voornamelijk door Arbed geleverde I- en H- profielen zijn gebruikt, geleid tot de vraag of de toegepaste proefstukken wel voldoende representatief zijn voor alle materialen die volgens Annex D worden toegelaten. Een en ander heeft geleid tot een briefwisseling met ARBED (doc. CA-93-42) en een aanpassing van het oorspronkelijke rapport [1.7] alsmede het indienen via het NNI van commentaar op Annex D (doc. CA-93-51). CEN/TC 250 Sc3 heeft dit commentaar in haar in juni 1993 gehouden vergadering echter niet overgenomen. In Duitsland zijn in de "Zulassung" voor HISTAR [3.8] lagere knikkrommen aangegeven. Getracht wordt om uiteindelijk tot uniforme regels te komen.

Verder wordt binnen de CIDECT een voorstel voorbereid om buisprofielen in HRS in een hogere knikkromme in te delen. In het verleden uitgevoerde proeven hebben aangetoond dat dit gerechtvaardigd is. Zie ook het deelrapport van dr. Puthli [1.7].

Voor de rotatiecapaciteit is de verstevigingsmodulus en daarmee samenhangend de f_t/f_y verhouding belangrijk. In Aken is hier uitgebreid onderzoek naar gedaan. Dit onderzoek vormt de achtergrond voor de betreffende rekenregels in Annex D, zie bijlage 1 en het deelrapport [1.7], alsmede [3.11].

3. RICHTLIJNEN VOOR HET CONSTRUEREN IN HRS

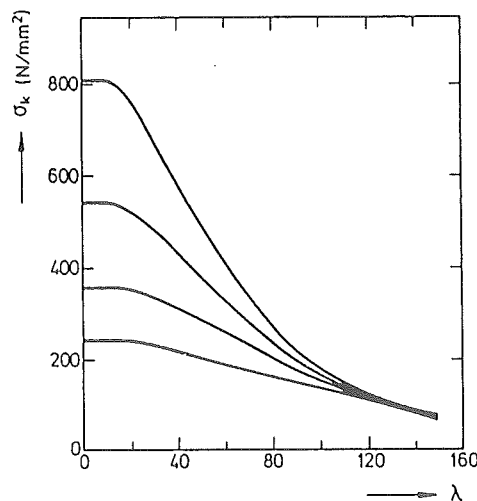
Bij het ontwerpen van staalconstructies moet rekening worden gehouden met een groot aantal verschillende factoren. Deze betreffen naast de mechanische eigenschappen zoals sterkte, stijfheid, weerstand tegen bros breken en weerstand tegen vermoeiing, vooral de fabricagekosten en de kosten die samenhangen met het gebruik van constructie.

Het belangrijkste kenmerk van HRS is uiteraard de grotere sterkte waardoor lichter kan worden geconstrueerd. Dit laatste kan belangrijke kostenbesparingen met zich meebrengen. Bij de factoren die een rol spelen bij keuze van de materiaalsterkte kunnen technische aspecten en aspecten ten aanzien van de kostprijs en de beschikbaarheid worden onderscheiden.

a. Technische aspecten

Bij hoge rekgrens staal zal het materiaalverbruik in het algemeen kleiner zijn; er kan lichter worden geconstrueerd. Dit is met name het geval in constructies waar:

- Stabiliteit niet maatgevend is. Voorbeelden zijn trekstaven, liggers die zodanig zijn geconstrueerd dat plooiën en kippen niet maatgevend zijn, en drukstaven met relatief kleine slankheid (zie figuur 3.1).



Figuur 3.1: Knikspanning als functie van de slankheid voor verschillende staalsoorten.

- Stijfheid niet maatgevend is. Bij hoge rekgrens staal nemen de spanningen en dus ook de rekken toe (de E-modulus blijft gelijk). De stijfheidseis kan er toe leiden dat het toepassen van een hogere rekgrens staal niet zinvol is, dan wel dat er moet worden gezocht naar een aanpassing van de constructievorm. Bijvoorbeeld een vakwerkligger in plaats van een plaatligger.

Stijfheid kan in twee opzichten belangrijk zijn, namelijk bij statische belasting (doorbui-

ging van liggers in gebouwen en dergelijke) en bij dynamische belasting (resonantie en opslingering bij bruggen, kraanbanen, slanke constructies die door de wind worden belast).

- Vermoeiing niet maatgevend is. De vermoeiingslevensduur van (gelaste) constructies is nagenoeg onafhankelijk van de staalsoort. De vermoeiingslevensduur wordt in hoofdzaak bepaald door het constructiedetail en door de grootte en het aantal van de optredende spanningswisselingen. De vermoeiingslevensduur kan eventueel worden verbeterd door aanpassen van het constructiedetail, bijvoorbeeld een K-las in plaats van een dubbele hoeklas. Zie NEN 2063: Booglassen. Op vermoeiing belaste constructies.

b. Kostprijs en beschikbaarheid

Hierbij spelen de volgende factoren een rol:

- Minder materiaalgebruik leidt in het algemeen tot lagere kosten voor de aankoop van het materiaal. Omdat hogere rekgrens staal per kg duurder is, is de kostenbesparing niet evenredig met het kleinere gewicht.
- Een kleinere plaatdikte is vooral ook van belang voor de verwerkingskosten. Zo geeft een kleinere plaatdikte een kleinere lasdikte, dus minder lasinhoud (de lasinhoud is ongeveer evenredig met het kwadraat van de plaatdikte!). Als bij toepassing van een goed lasbare hogere rekgrens staalkwaliteit (bijvoorbeeld een TM staal), ook nog niet hoeft te worden voorverwarmd, dan kan dit een aanzienlijke kostenbesparing betekenen ten opzichte van bijvoorbeeld een conventioneel staal S 355. Zie ook het eindrapport van het deelproject verwerkbaarheid [1.8].
- Transportkosten, kosten tijdens montage (hijskosten bijvoorbeeld) spelen een rol.
- Een eventuele geringere constructiehoogte van vloerconstructies kan er toe leiden dat de hoogte van een gebouw kan worden beperkt, hetgeen ondermeer gunstig is voor het geveleppervlak en het energieverbruik.
- Geringere afmetingen van bijvoorbeeld kolommen hebben een gunstig effect op de beschikbare vloeroppervlakte.
- Bij de constructie van voertuigen zoals tankauto's en hijsgereedschappen zoals mobiele kranen speelt het eigen gewicht een zeer belangrijke rol, zodat de toepassing van hogere rekgrens staal daar snel economisch is.
- Hoge rekgrens staalsoorten en bijzondere kwaliteiten zijn in het algemeen minder goed leverbaar, zodat tijdig informeren en bestellen belangrijk is.

Ten aanzien van de keuze van de materiaalkwaliteit en overige aan de betreffende staalsoort te stellen eisen kan worden verwezen naar:

- Annex D van Eurocode 3 (zie de bijlage);
- Het in voorbereiding zijnde CEN/TC 135 document over de aanvullende regels voor de

vervaardiging van constructies uit HRS [3.3];

- Het eindrapport van het NIL deelproject Verwerkbaarheid HRS [1.8].

Daarnaast geven ook de leveranciers van HRS aanwijzingen voor de verwerking van hun produkten (bijvoorbeeld ARBED met HISTAR balk- en kolomprofielen, Dillinger Hüttenwerke met plaatmateriaal en Swedish Steel eveneens met plaatmateriaal).

Voor verdere informatie over het *toepassen van HRS* wordt verwezen naar het voorlichtingsblad VM 84 [2.7]. Daarin zijn ook verschillende toepassingsvoorbeelden genoemd.

4. AFSLUITENDE OPMERKINGEN

- a. Door de ontwikkelingen op het gebied van de staalbereiding, de walsprocessen en de gloeibehandelingen is de kwaliteit van hoge rekgrens staal sterk verbeterd. Hierdoor zijn de problemen die in het verleden verbonden waren aan de verwerking aan hoge rekgrens staal sterk afgenomen. Ook de ontwikkelingen op het gebied van de lastoevoegmaterialen (hoge taaiheid, laag waterstofgehalte) hebben hier aan bijgedragen.
- b. Bij de verwerking dient men rekening te houden met de specifieke eigenschappen van hoge rekgrens staal. Voor meer informatie wordt verwezen naar het eindrapport van het deelproject verwerkbaarheid [1.8].
- c. Het construeren in hoge rekgrens staal kan tot belangrijke kostenbesparingen leiden bij de fabricage en/of het gebruik van constructies.
- d. Met het verschijnen van Annex D van Eurocode 3 en de bijbehorende voorschriften voor de vervaardiging zal een belangrijke belemmering voor het toepassen van HRS worden weggenomen. Het betreft hier staalsoorten tot en met S 460.
- e. De resultaten van het NIL-HRS onderzoek "Constructieve Aspecten" hebben bijgedragen aan de ontwikkeling van deze voorschriften. Daarnaast heeft de uitwisseling van kennis met onderzoekers op het gebied van HRS in andere Europese onderzoekcentra bijgedragen aan het opbouwen van expertise op het gebied van het construeren in HRS.
- f. De resultaten zijn vastgelegd in verschillende rapporten en uitgedragen in publicaties en presentaties, zie par. 6.2.

5. AANBEVELINGEN VOOR VERDER ONDERZOEK

Uit hoofdstuk 2 moge blijken dat een aantal onderwerpen nog verdere discussie/onderzoek zullen vergen alvorens de definitieve versies van de onder par. 6.3 genoemde voorschriften en het voor Nederland belangrijke "National Application Document" (NAD) zullen worden gepubliceerd. Het thans uitgevoerde onderzoek levert daarvoor een bijdrage.

Als meer specifieke punten voor verder onderzoek kunnen worden genoemd:

- a. De invloed c.q. de toelaatbaarheid van lasfouten. De hogere spanningen zullen vermoedelijk strengere eisen stellen aan de grootte en aard van lasfouten en/of aan de taaiheid. Ook zaken als overmatched en undermatched lasmetaal spelen hierbij een rol, alsmede het onderscheid tussen de gespecificeerde waarden voor f_t en f_y en de werkelijk aanwezige waarden voor f_t en f_y .
- b. De toepasbaarheid van materialen met $f_t/f_y < 1,2$. Bij de staalfabricage kunnen door de manier van walsen en het daarbij aan te houden temperatuurverloop hoge sterkten worden bereikt bij extreem laag koolstofequivalent. Hierdoor ontstaat een goede lasbaarheid, waardoor zelfs bij zeer dikke platen in S 460 voorverwarmen veelal niet nodig is. Consequentie hiervan is echter een verlaging van de f_t/f_y verhouding, die in sommige gevallen tot 1,1 nadert. Daarbij kan onderscheid worden gemaakt tussen de gespecificeerde waarden voor f_t en f_y en de werkelijk aanwezige waarden.
Volgens NEN 6770 moet voor staalsoorten tot S 355, de verhouding tussen de representatieve (gespecificeerde) waarden van f_t en f_y meer zijn dan 1,2, terwijl de verhouding tussen de werkelijk aanwezige waarden van f_t en f_y tenminste gelijk moet zijn aan 1,11.
Zoals eerder in deze alinea is aangegeven, is er bij hoge rekgrens staal een tendens tot verdere verlaging van de verhouding tussen f_t en f_y . Meer inzicht in de consequenties van zeer lage f_t/f_y verhoudingen voor het constructiegedrag en de toe te passen vormgeving om aan mogelijke problemen tegemoet te komen, is gewenst.
- c. De stabiliteit van lijven van plaatliggers in HRS bij inleiding van lokale krachten, bijvoorbeeld door dwarsdragers bij bruggen.
- d. De toepassing van S 690. Het beschikbaar komen van goed verwerkbare materialen in deze sterkteklasse doet de behoefte aan ontwerp en rekenregels hiervoor toenemen.

6. RAPPORTEN, PUBLICATIES, REFERENTIES, DOCUMENTENLIJST

6.1 Uitgebrachte rapporten

- [1.1] Gresnigt, A.M., Eindrapport NIL-onderzoek constructieve aspecten bij hoge rekgrens staal S 460. Stevin Laboratorium rapport 25-06-93-42, september 1993 (= dit rapport).
- [1.2] Liu, D.K., Gresnigt, A.M., Studies on welded connections in high strength steels, stresses and strains in lap joints. Stevin Laboratory report 25-06-91-08, final report 1993.
- [1.3] Pertermann, I., Gresnigt, A.M., Welded beam-to-column connections. State of the art report with regard to high strength steel S 460. Stevin Laboratory report 25-06-93-05, January 1993.
- [1.4] Pertermann, I., Gresnigt, A.M., Comparison of tensile tests on the tension zone of welded beam-to-column connections in high strength steel and mild steel. Stevin Laboratory report 25-06-93-07, January 1993.
- [1.5] Pertermann, I., Gresnigt, A.M., Comparison of compression tests simulating the local compressive strength of unstiffened beam-to-column connections in high strength steel and mild steel. Stevin Laboratory report 25-06-93-06, January 1993.
- [1.6] Pertermann, I., Gresnigt, A.M., Evaluation of tensile tests on welded beam-to-column connections in high strength steel (S 460 TM). Stevin Laboratory report 25-06-93-08, January 1993.
- [1.7] Puthli, R.S., Stability behaviour of structural members in high strength steel, TNO-Bouw report B-92-0856, November 1992, revision 1, July 1993.
- [1.8] Vuik, J., Eindrapport Deelproject "Verwerkbaarheid". Nederlands Instituut voor Lastechniek, Apeldoorn, rapport NIL-HRS-93-36.
- [1.9] Gresnigt, A.M., Eindrapport Deelproject "Toepassing van hoge rekgrens staal voor transportleidingen". Stevin Laboratorium rapport 25-06-93-..., Januari 1994.

(Ik neem aan dat de bovenstaande rapporten in de definitieve versie tevens een NIL nummer zullen krijgen).

6.2 Publicaties

- [2.1] Gresnigt, A.M., Strength and deformation capacity of fillet welds in FeE 460. Connections in Steel Structures II: Behaviour, Strength and Design. ECCS and AISC, Pittsburgh, December 1991.
- [2.2] Gresnigt, A.M., Pertermann, I., Connections in high strength steel. Researchdag Staalbouwkundig Genootschap, Delft, 23 March 1993.
- [2.3] Dijkstra, O.D. en Van Rongen, H.J.M., Toepassingen en functionele eigenschappen van hoge rekgrens staal. Researchdag Staalbouwkundig Genootschap, Delft, 23 maart 1993.
- [2.4] Vuik, J. Verwerken van hoge rekgrens staal. Researchdag Staalbouwkundig Genootschap, 23 maart 1993.

- [2.5] Gresnigt, A.M., Sterkte en taaheid van gelaste verbindingen. Lasdag, Staalbouwkundig Genootschap, Delft, 23 november 1993.
- [2.6] Dijkstra, O.D., Van Rongen, H.J.M. Toepassingen en functionele eigenschappen van hoge rekgrens staal. Researchdag Staalbouwkundig Genootschap, 23 maart 1993.
- [2.7] Gresnigt, A.M., Van Lent, P.H., Sloterdijk, W., Laaggelegeerd staal met hoge sterkte. VM publicatie nr. 84. Vereniging FME, Zoetermeer, maart 1990.

6.3 Referenties

- [3.1] Eurocode 3, Design of Steel Structures, part 1.1: General rules and rules for buildings. ENV 1993-1-1, CEN, 1992.
- [3.2] Annex D to Eurocode 3. The use of steel grades S 460 and S 420. Draft ENV 1993-1-1 prA1, 14 July 1993.
- [3.3] Draft prEN 1090-3 Execution of steel structures - Part 3: Supplementary rules for the use of high strength steels. CEN/TC 135 N142, 1993-08-31.
- [3.4] NEN-EN 10113. Warmgewalste produkten van fijnkorrelig constructiestaal.
 - Deel 1: Algemene leveringsvoorwaarden (NEN-EN 10113-1).
 - Deel 2: Leveringsvoorwaarden voor normaalgegleide/normaliserend gewalste staalsoorten. (NEN-EN 10113-2).
 - Deel 3: Leveringsvoorwaarden voor thermomechanisch gewalste staalsoorten. (NEN-EN 10113-3).

Engelse versie: EN 10113. Hot rolled products in weldable fine grain structural steels. Part 1: General delivery conditions (EN 10113-1: 1993) - Part 2: Delivery conditions for normalized steels (EN 10113-2: 1992) - Part 3: Delivery conditions for thermomechanical rolled steels (EN 10113-3: 1992). CEN, September 1992.
- [3.5] NEN 6770. TGB 1990 - Staalconstructies - Basiseisen en basisrekenregels. NNI 1991.
- [3.6] NEN 6771. TGB 1990 - Staalconstructies - Stabiliteit. NNI 1991.
- [3.7] NEN 6772. TGB 1990 - Staalconstructies - Verbindingen. NNI 1991.
- [3.8] Schweissgeeigneter Feinkornbaustahl StE 460 TM HISTAR. Institut für Bautechnik. Zulassungsbescheid Z-30.88.2, Berlin, Juli 1991.
- [3.9] Arbed Research. Various theoretical and experimental research programmes on HISTAR steel 1990-1993.
- [3.10] Arbed. Documentatie hoge sterkte staal (HISTAR) 1993.
- [3.11] Sedlacek, G., Stability aspects of high strength steels. Researchdag Staalbouwkundig Genootschap, Delft, 23 maart 1993.
- [3.12] Haaijer, G., Beckman, F.R. Structural applications of quenched and tempered steels. Pacific Structural Steel Conference 1989. Australian Institute of Steel Construction.
- [3.13] Treiberg, T. Influence of base and weld material strength on the strength of welds. Connections in Steel Structures II: Behavior, Strength and Design. ECCS and AISC, Pittsburgh, December 1991.
- [3.14] Swedish Regulations for Steel Structures BSK. Swedish Institute of Steel Construction. Publication 118, 1989.

- [3.15] Denys, R.M. Provisional definitive statement on the significance of over- and undermatching weld metal strength. Doc. IIW-X-1222-91, The Hague, 1991.
- [3.16] Scheer, J. et al. Tests with bolted connections of members made from FeE 460. Report No. 8175 of the Institute of Steel Construction, Technical University of Braunschweig, June 1989. Also from the same authors: Tension tests of FeE 460. Report No. 8175/1, June 1989.
- [3.17] Dowling, P. et al. Investigations of bolted connections made from steel FeE 460. Imperial College of Science & Technology, Department of Civil Engineering, London, June 1989.
- [3.18] Aribert, J.M. et al. Investigation of the local tensile strength in a welded H section joint and investigation of the local compressive strength of the web of metallic H- or I-sections. INSA, Rennes, July 1989.
- [3.19] Snijder, H.H., De Koning, C.H.M., Gresnigt, A.M., Bijlaard, F.S.K. Tests on welded connections in FeE 460. TNO - Building and Construction Research, report B-89-459, October 1989.
- [3.20] Sedlacek, G., Hensen, W. Background Documentation to Annex D of Eurocode 3. Document D.01: Background document for design rules specific for high strength steels according to EN 10113, April 1990.
Document D.02: Statistical evaluations of test results on bolted connections, April 1990.
Document D.03: Statistical evaluations of test results on welded connections, April 1990.
Document D.04: Statistical analysis of strength functions for welded H-section joints with respect to available experimental data, April 1990.
Document D.05: Background document for design rules specific for high strength steel columns according to EN 10113. First draft, October 1992.
- [3.21] Kouhi, J., Kortessmaa, M. Strength tests on bolted connections using high strength steels (HSS steels) as a base material. VTT - Technical Research Center of Finland report 1185, Espoo, 1990.

6.4 Documentenlijst

Onderstaand volgt een selectie van de belangrijkste documenten van de werkgroep Constructieve Aspecten, voor zover hierboven nog niet vermeld.

- HRS-WG-CA-89-01 Uitwerking onderzoekvoorstel t.a.v. constructieve aspecten. Oktober 1989.
- HRS-WG-CA-90-08 Tests on fillet weld joints with high strength steel specimens. Erkki Niemi, Lappeenranta, 1988, doc. ECCS-TC10-88-276.
- HRS-WG-CA-90-09 Analysis of the tests of Niemi /1/ according to the Swedish regulations. T. Treiberg, Stockholm, 1989, doc. ECCS-TC10-89-TWG5-10.
- HRS-WG-CA-90-10 Research RPS/ADI: QST phase 2 - Tests of H-profiles relating to Steel Constructions. ARBED, 1990.
- HRS-WG-CA-90-11 Annex C of Eurocode 3: Design against Brittle Fracture - Provi-

- sional Guide. 1990.
- HRS-WG-CA-91-21 The b/t ratios controlling the applicability of analysis models in eurocode 3.
- HRS-WG-CA-91-22 Comments to Annex D of Eurocode No 3: The use of steel grade Fe E 460 (preliminary version January 1991). A.M. Gresnigt, August 1991.
- HRS-WG-CA-91-23 Brief van T.J.A. Aalders met commentaar op Annex D (versie januari 1991), 28 maart 1991.
- HRS-WG-CA-92-35 Voorstel voor twee proeven op geboute balk-kolom verbindingen om de vervormingscapaciteit na te gaan. P. Zoetemeijer, 7 september 1992.
- HRS-WG-CA-92-36 Zulassungsbescheid StE 460 TM HISTAR. Institut für Bautechnik, July 1991.
- HRS-WG-CA-92-41 Stability behaviour of structural members in high strength steel. R.S. Puthli, November 1992, draft TNO-Bouw rapport B-92-0856, zie ook onder par 5.1 uitgebrachte rapporten.
- HRS-WG-CA-93-42 Brief van ARBED over het rapport: Stability behaviour of structural members in high strength steel (doc. HRS-WG-CA-92-41).
- HRS-WG-CA-93-42a Bijlage bij doc. 42: Buckling tests on HISTAR columns.
- HRS-WG-CA-93-42b Bijlage bij doc. 42: Residual stresses in HISTAR cross-sections.
- HRS-WG-CA-93-42c Bijlage bij doc. 42: Draft annex D van september 1992 (N201E).
- HRS-WG-CA-93-42d Bijlage bij doc. 42: Background document D.05 for design rules specific for high strength steel columns according to EN 10113, October 1992.
- HRS-WG-CA-93-42e Bijlage bij doc 42: Wijziging Zulassungsbescheid StE 460 TM HISTAR van 15 juli 1991, 7 december 1992.
- HRS-WG-CA-93-46 J. Defourny and A. Bragard: The significance of Charpy V energy and ratio Rm/Re for steel structures. Doc. IIW-IX-1442-86.
- HRS-WG-CA-93-48 R.J. van Foeken: Tensile tests on welded beam-to-plate connections in FeE 460 TM. TNO-Bouw rapport B-92-0391, April 1992.
- HRS-WG-CA-93-51 Comments on Draft Annex D from NNI. A.M. Gresnigt, R.S. Puthli, I. Pertermann, 26 may 1993.
- HRS-WG-CA-93-53 Annex D van Eurocode 3: The use of steel grades S 460 and S 420. Draft ENV 1993-1-1 prA1, 14 July 1993.
- HRS-WG-CA-93-54 Brief naar Dr. J.C. Taylor (CEN/TC250 Sc3) met opmerkingen en vragen over de laatste versie van Annex D. A.M. Gresnigt en J.W.B. Stark, 21 september 1993.

Annex D [normative]

The use of steel grades S 460 and S 420

D.1 Scope

(1)P This annex extends the application of Eurocode 3: Part 1.1 to steel grades S 460 and S 420 of European Standard EN 10113 and steel grade S 460 of European Standard EN 10137.

D.2 Contents

(1)P D.3 to D.9 extend the corresponding Chapters of Eurocode 3: Part 1.1, together with the related annexes as follows:

- | | |
|---|-------------------------------------|
| - D.3 Materials | Chapter 3 and annexes B and C |
| - D.4 Serviceability limit states | Chapter 4 |
| - D.5 Ultimate limit states | Chapter 5 and annexes E and F |
| - D.6 Connections subject to static loading | Chapter 6 and annexes J, K, L and M |
| - D.7 Fabrication of EN 10113 steels | Chapter 7 |
| - D.8 Design assisted by testing | Chapter 8 and annex Y |
| - D.9 Fatigue | Chapter 9 |

NOTE: D.7 is finally intended to cover steels to both EN 10113 and EN 10137 but to include only those fabrication provisions which are relevant for design. At the present stage of development, pending the availability of provisions for high strength steels in EN 1090 'Execution of steel structures', D.7 temporarily also contains provisions concerning fabrication of EN 10113 steels but does not cover steel to EN 10137. It is expected that in the future EN 1090 will contain appropriate provisions for both EN 10113 and EN 10137 steels which will supersede these temporary provisions.

(2)P The provisions of Chapters 1 and 2 apply without change to steel grades S 460 and S 420.

D.3 Materials

D.3.1 Structural steel

(1)P The material properties given in this clause are nominal values to be adopted as characteristic values in design calculations only.

(2)P Other properties are given in EN 10113 and EN 10137.

(3)P The nominal values of the yield strength f_y and the ultimate tensile strength f_u are given in table D.1 for steel grades S 460 and S 420 to EN 10113 and steel grade S 460 to EN 10137.

(4)P The nominal values in table D.3.1 may be adopted as characteristic values in calculations.

(5)P As an alternative the minimum values specified in EN 10113 for a larger range of thicknesses may be used.

Table D.1 : Nominal values of yield strength f_y and ultimate tensile strength f_u

Nominal steel grade to EN 10113	Thickness t mm ¹⁾			
	$t \leq 40$ mm		$40 \text{ mm} < t \leq 100$ mm ²⁾	
	f_y (N/mm ²)	f_u (N/mm ²)	f_y (N/mm ²)	f_u (N/mm ²)
S 460 N	460	550	430	550
S 460 M	460	530	430	530
S 420 N	420	520	390	520
S 420 M	420	500	390	500

Nominal steel grade to EN 10137	Thickness t mm ¹⁾					
	$t \leq 50$ mm		$50 \text{ mm} < t \leq 100$ mm		$100 \text{ mm} < t \leq 150$ mm	
	f_y (N/mm ²)	f_u (N/mm ²)	f_y (N/mm ²)	f_u (N/mm ²)	f_y (N/mm ²)	f_u (N/mm ²)
S 460 Q	460	550	440	550	400	500

1) t is the nominal thickness of the element

2) 63 mm for plates and other flat products in steels of delivery condition M to EN 10113-3

(6)P Similar values may be adopted for structural hollow sections to European Standards EN 10210 and EN 10219.

(7)P The material shall have sufficient fracture toughness to avoid brittle fracture at the lowest service temperature expected to occur within the intended life of the structure.

(8) In normal cases of welded or non-welded members in building structures subject to static loading or fatigue loading (but not dynamic loading), no further check against brittle fracture is necessary if the conditions given in table D.2 are satisfied.

(9) For all other cases reference should be made to annex C.

(10) In annex C the base value of the lower yield strength f_{y0} should be taken as 460 N/mm² for steel grade S 460 and 420 N/mm² for steel grade S 420.

(11)P When steel grade S 460 or S 420 to EN 10113 or steel grade S 460 to EN 10137 is used, plastic analysis may be utilised in the global analysis of structures or their elements.

D.3.2 Welding consumables

(1)P All welding consumables shall conform with Reference Standard 4, see annex B.

(2)P The specified yield strength, ultimate tensile strength, elongation at failure and minimum Charpy V-notch energy value of the filler metal shall all be either equal to, or better than, the corresponding values specified for the steel grade being welded.

**Table D.2 : Maximum thickness for statically loaded structural elements
 without reference to annex C**

Steel grade and quality	Maximum thickness (mm) for lowest service temperature of:					
	0 °C		-10 °C		-20 °C	
Service condition	S1	S2	S1	S2	S1	S2
EN 10113: ¹⁾						
S 460 ²⁾	179	53	150	38	99	28
S 460 L ³⁾	250	150	250	101	250	69
S 420 ²⁾	250	70	162	50	140	36
S 420 L ³⁾	250	172	250	145	250	94
EN 10137: ⁴⁾						
S 460 Q	126	34	86	25	61	18
S 460 QL	150	86	150	61	150	44
S 460 QL1	150	150	150	150	150	119
Service conditions: ⁵⁾ S1 Either: - non-welded, or - in compression. S2 As welded, in tension.						
In both cases this table assumes loading rate R1 and consequences of failure condition C2, see annex C.						
1) For steels of delivery condition N to EN 10113-2 over 100 mm thick for steel grade S 460 and over 150 mm thick for steel grade S 420, and for steels of delivery condition M to EN 10113-3 over 150 mm thick for long products and over 63 mm thick for flat products, the minimum Charpy V-notch energy specified in EN 10113 is subject to agreement. Up to 150 mm thick, a minimum value of 27 J is required and 23 J over 150 mm thick up to 250 mm. The test temperature should be -30 °C for steel qualities S 460 and S 420 and -50 °C for steel qualities S 460 L and S 420 L.						
2) For steel qualities S 460 and S 420 the specified minimum values of Charpy V-notch energy in EN 10113 only go down as far as 40 J at -20 °C. The entries in this row assume an equivalent value of 27 J at -30 °C.						
3) For steel qualities S 460 L and S 420 L the specified minimum value of Charpy V-notch energy in EN 10113 is 27 J at -50 °C.						
4) In EN 10137-2 the maximum thickness specified for quenched and tempered steels is 150 mm. The specified minimum value of Charpy V-notch energy is 30 J in the longitudinal direction and 27 J in the transverse direction at test temperatures of -20 °C, -40 °C and -60 °C for qualities Q, QL and QL1 respectively. The values in this table are based on 27 J at the respective temperature for each quality.						
5) For full details of service conditions, refer to annex C.						

D.4 Serviceability limit states

- (1)P The serviceability limit states requirements given in Chapters 2 and 4 also apply to steelwork of steel grades S 460 and S 420.
- (2) The recommendations given in the application rules in Chapter 4 are also valid for steel grades S 460 and S 420.

D.5 Ultimate limit states

D.5.1 General

- (1)P The provisions given in Chapter 5 also apply to steel grades S 460 and S 420 except where special provisions are given in D.5.2 or D.5.3.

D.5.2 Flexural buckling

- (1)P For flexural buckling the appropriate buckling curve for steel grades S 460 and S 420 only shall be determined from table D.3.
- (2)P Sections not contained in these tables shall be classified analogously.
- (3)P The imperfection factor α corresponding to the appropriate buckling curve shall be obtained from table D.4.

Table D.4 : Imperfection factors

Buckling curve	a_0	a	b	c	d
Imperfection factor α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

- (4)P Values of the reduction factor χ for the appropriate non-dimensional slenderness $\bar{\lambda}$ may be obtained from table D.5.

- (5)P Tapered members and members with changes of cross-section within their length may be analysed using second order theory, incorporating the appropriate design value of the equivalent initial bow imperfection $e_{0,d}$ given in figure D.1 corresponding to the relevant buckling curve, depending on the method of analysis and type of cross-section verification.

Table D.3 : Selection of buckling curve for a cross-section

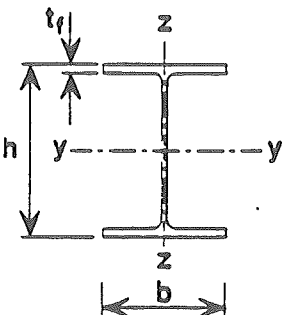
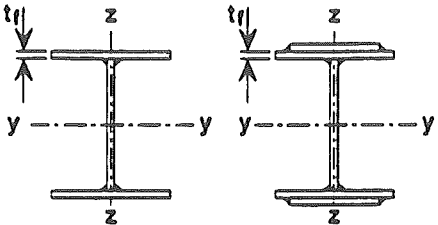
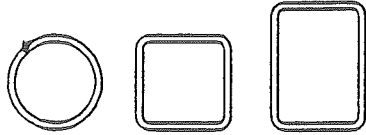
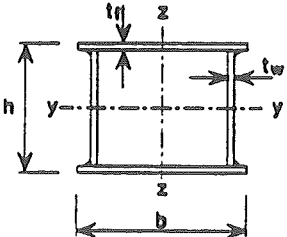
Cross section	Limits	Buckling about axis	S 460	S420
Rolled I sections 	$h/b > 1,2$:			
	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y - y z - z	a_0 a_0	a a
	$40 \text{ mm} < t_f \leq 100 \text{ mm}$	y - y z - z	a a	b b
	$h/b \leq 1,2$:			
	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	y - y z - z	a a	b b
	$t_f > 100 \text{ mm}$	y - y z - z	c c	d d
Welded I sections 	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y - y z - z	b c	b c
	$t_f > 40 \text{ mm}$	y - y z - z	c d	c d
Hollow sections 	hot finished	any	a	a
	cold formed - using f_{yb} ¹⁾	any	b	b
	cold formed - using f_{ya} ¹⁾	any	c	c
Welded box sections 	generally (except as below)	any	b	b
	thick welds and: $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$	y - y z - z	c c	c c
U, L, T and solid sections 		any	c	c
1) See 5.5.1.4(4) and figure 5.5.2.				

Table D.5 : Reduction factors

$\bar{\lambda}$	χ for buckling curve:				
	a_0	a	b	c	d
0,2	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,3	0,9859	0,9775	0,9641	0,9491	0,9235
0,4	0,9701	0,9528	0,9261	0,8973	0,8504
0,5	0,9513	0,9243	0,8842	0,8430	0,7793
0,6	0,9276	0,8900	0,8371	0,7854	0,7100
0,7	0,8961	0,8477	0,7837	0,7247	0,6431
0,8	0,8533	0,7957	0,7245	0,6622	0,5797
0,9	0,7961	0,7339	0,6612	0,5998	0,5208
1,0	0,7253	0,6656	0,5970	0,5399	0,4671
1,1	0,6482	0,5960	0,5352	0,4842	0,4189
1,2	0,5732	0,5300	0,4781	0,4338	0,3762
1,3	0,5053	0,4703	0,4269	0,3888	0,3385
1,4	0,4461	0,4179	0,3817	0,3492	0,3055
1,5	0,3953	0,3724	0,3422	0,3145	0,2766
1,6	0,3520	0,3332	0,3079	0,2842	0,2512
1,7	0,3150	0,2994	0,2781	0,2577	0,2289
1,8	0,2833	0,2702	0,2521	0,2345	0,2093
1,9	0,2559	0,2449	0,2294	0,2141	0,1920
2,0	0,2323	0,2229	0,2095	0,1962	0,1766
2,1	0,2117	0,2036	0,1920	0,1803	0,1630
2,2	0,1937	0,1867	0,1765	0,1662	0,1508
2,3	0,1779	0,1717	0,1628	0,1537	0,1399
2,4	0,1639	0,1585	0,1506	0,1425	0,1302
2,5	0,1515	0,1467	0,1397	0,1325	0,1214
2,6	0,1404	0,1362	0,1299	0,1234	0,1134
2,7	0,1305	0,1267	0,1211	0,1153	0,1062
2,8	0,1216	0,1182	0,1132	0,1079	0,0997
2,9	0,1136	0,1105	0,1060	0,1012	0,0937
3,0	0,1063	0,1036	0,0994	0,0951	0,0882

D.6 Connections subject to static loading

D.6.1 General

(1)P The provisions given in Chapter 6 also apply to steel grades S 460 and S 420 except where special provisions are given in D.6.2 or D.6.3.

(2)P Connections subject to fatigue shall also satisfy the requirements given in Chapter 9.

D.6.2 Design resistance of a fillet weld

(1)P The design resistance per unit length of a fillet weld shall be determined using either the method given in 6.6.5.3 or the alternative method given in annex M.

(2) The value of the correlation factor β_w should be taken as 1,0 for steel grades S 460 and S 420.

D.6.3 Beam-to-column connections

(1) The provisions of annex J for the design of beam-to-column connections also apply to steel grades S 460 and S 420 except as given in (2) and (3).

(2) In J.2.3.2(4) when the longitudinal welds are fillet welds:

$$t_{w,eff} = 1,3t_{wc}$$

(3) In J.2.4.1(1) and in J.3.5.1(1) the design crushing resistance of an unstiffened column web should be determined using expression (D.1) in D.5.3(1) for steel grade S 460 only, but for steel grade S 420 expression (5.77) in 5.7.4(1) should be used.

D.6.4 Hollow section lattice girder connections

(1) The application rules given in annex K should not be applied to steel grades S 460 or S 420 without further experimental verification.

D.7 Fabrication of EN 10113 steels

D.7.1 General

D.7.1.1 Scope of D.7

(1)P The provisions of Chapter 7 generally apply also to steel grades S 460 and S 420. D.7 is concerned with additional and modified provisions for these grades.

(2)P Additional guidance is given in D.7 for the fabrication of steel to grades S 460 and S 420 of European Standard EN 10113.

(3)P D.7 also specifies additional requirements for the welding of steel to grades S 460 and S 420 of EN 10113.

(4) Pending the preparation of a European Standard covering the fabrication and welding of quenched and tempered steel, the recommendations of the steel producers and the manufacturers of the welding consumables should be followed in the case of steel grade S 460 to EN 10137.

D.7.1.2 Type of steel

(1)P Account shall be taken of the fact that steel to grades S 460 and S 420 of EN 10113 can be produced by several different manufacturing processes using substantially different heat treatments and chemical compositions of the steel in order to produce materials with similar mechanical properties.

(2)P Because chemical composition and heat treatment conditions have an important influence on the behaviour of a material during fabrication, the following delivery conditions shall be distinguished:

- M: Thermomechanical rolled steel.
- N: Normalized steel.

NOTE 1: Thermomechanical rolling is a rolling process in which the final deformation is carried out in a particular temperature range leading to a material condition with certain material properties which cannot be achieved or repeated by heat treatment alone.

(3)P Thermomechanical rolled steel may also include steel produced by the following processes:

- accelerated cooling without tempering (AC)
- quenching and self-tempering (QST)

(4)P Normalized steel may also include normalized rolled steel.

NOTE 2: Normalizing rolling is a rolling process in which the final deformation is carried out in a particular temperature range leading to a material condition equivalent to that obtained after normalizing. The specified values of the mechanical properties are retained even after normalizing.

(5)P Steel in delivery condition M shall not be normalized. Only steel in delivery condition N may be normalized.

(6) Steels delivered in different delivery conditions differ significantly regarding their chemical compositions and heat treatment conditions. For this reason the recommendations of the steel producer regarding fabrication and welding should be obtained, and evaluated in relation to the specific structure and proposed fabrication procedure.

(7) Where steels of different delivery conditions have to be welded to each other, the specific fabrication requirements should be verified and documented.

D.7.2 Forming

D.7.2.1 Hot forming

(1)P Steel in delivery condition M shall not be hot formed unless it has been proved by testing that the procedure to be used, including the temperature range, will not reduce the mechanical properties of the steel below those specified.

(2)P Steel in delivery condition N may be hot formed. The upper temperature during hot forming shall not exceed 1050 °C.

(3) The last step of a hot forming process for steel in delivery condition N should take place in the temperature range from 750 °C to 980 °C with subsequent cooling at air temperature.

(4)P In order to avoid hardening, the cooling rate needs to be limited. Where this is not practicable, a subsequent normalizing treatment shall be performed.

D.7.2.2 Cold forming

- (1)P Material in both delivery conditions M and N may be cold formed.
- (2) During cold forming the higher tensile and resilience properties of S 460 or S 420 steel, compared to S 355 steel, should be taken into account.
- (3)P If, after cold forming, a stress relief treatment has to be carried out, the following conditions shall both be satisfied for delivery conditions M and N:
- a) temperature range: 530 °C to 580 °C
 - b) holding time: 2 minutes per mm of material thickness, but at least 30 minutes.

NOTE: Stress relief treatment at more than 580 °C, or for over an hour, may lead to deterioration of the mechanical properties. Where it is intended to stress relieve S 460 or S 420 steels at higher temperatures or for longer times, the required minimum values of the mechanical properties should be agreed in advance with the steel producer.

D.7.3 Cutting

- (1)P During cutting, the higher tensile properties of S 460 or S 420 steel, compared to S 355 steel, shall be taken into account.

D.7.4 Welding

D.7.4.1 Weldability

- (1)P Grade S 460 and S 420 steels may be welded using all the welding processes listed in 6.6.1(2), provided that the general provisions for welding given in Reference Standard 9 (see annex B) and the special provisions given in this annex D are followed.
- (2)P Only suitably qualified workshops and certified welders, using qualified welding procedures, shall fabricate grade S 460 or S 420 steels.
- (3) Where S 460 or S 420 steels of different delivery conditions (M or N) are to be joined by welding, the recommendations of the steel producers should be followed.

D.7.4.2 Bevelling

- (1)P Bevelling may be carried out either by machining or by flame or plasma cutting.
- (2)P In the case of flame or plasma cutting, the preheating requirements given in D.7.4.5 shall be satisfied.
- (3)P Cut areas shall be descaled by grinding, and verified to be sound and free from cracks by means of a visual inspection and either a dye penetrant test or a similar test.

D.7.4.3 Welding consumables

- (1)P The specified mechanical properties of the filler metal shall generally match those specified for the grade of steel to be welded, see D.3.2(2).
- (2)P For manual metal arc welding and submerged arc welding, basic electrodes and powders shall normally be used. In any other case the recommendations of the steel producer shall be followed.
- (3)P When hydrogen controlled welding consumables are to be used, the fabricator shall be able to demonstrate that he has used the consumables in the manner recommended by the consumable manufacturer, and that the consumables have been dried or baked to the appropriate temperature levels and times.
- (4)P In all cases welding consumables shall be selected having regard to the particular application, including the design of the joint, the welding position and the properties required to meet service conditions.
- (5)P If welds are to be subjected to a heat treatment, its influence on weld metal properties shall be taken into account.
- (6) The recommendations of the welding consumable manufacturers should be consulted for information on weld metal properties after heat treatment.
- (7)P In the case of high alloy welding consumables, the heat treatment recommendations of the welding consumable manufacturer shall be followed.

NOTE: In the normalized condition, weld metal tensile properties are lower than in the as-welded condition.

D.7.4.4 Toughness

D.7.4.4.1 Heat affected zone

- (1)P The toughness properties of the heat affected zone may be inferior to those specified for the grade of steel to be welded, provided that the heat affected zone has sufficient toughness for the particular service conditions.

NOTE: The toughness is generally specified in terms of the Charpy V-notch impact energy at a specified temperature.

- (2)P For some applications it may be necessary to control the heat input by specifying the minimum and maximum allowed. This range of heat input will vary depending on steel type, thickness, preheat and the required toughness of the heat affected zone.
- (3) The steel producer should be consulted as to the most suitable steel to meet the specified level of toughness of the heat affected zone at the heat inputs to be used.

D.7.4.4.2 Weld metal

- (1)P The welding technique exerts a considerable influence on the toughness achieved in a welded joint. Account shall be taken of the various factors in the welding procedure which affect the toughness properties.
- (2) For guidance on the achievement of specific toughness values in the weld metal at a particular temperature, the recommendations of the welding consumable manufacturer and of the steel producer should be followed.

D.7.4.5 Preheating

(1)P The need for preheating before welding shall be determined on the basis of the chemical composition of the steel and of the filler metal.

(2) Pending the preparation of a European Standard covering the preheating requirements for a given steel grade, the recommendations of the steel producer should be followed and documented.

NOTE: Steels of supply condition M with low carbon equivalent values are available which generally do not require preheating for thicknesses up to 50 mm. This limit can be increased for certain steels with very low carbon equivalent values.

(3)P Where preheating is required, refer also to Reference Standard 9, see annex B.

(4)P The preheating temperature is the required temperature of the steel to be welded, immediately before welding commences. The same value may generally be used as the minimum inter-pass temperature for multi-run welds.

(5)P Where preheating is applied locally to the joint preparation, the required temperature shall exist in the parent metal for a distance of at least 100 mm, but not less than four times the material thickness in all directions from the joint preparation.

(6) Where practicable, the preheating temperature should be measured on the face opposite to that being heated. Otherwise the preheating temperature should be confirmed on the heated face at a suitable time after removal of the heat source, appropriate to the thickness of the parent metal, to allow for preheating temperature equalization.

(7) Where fixed permanent heaters are used and there is no access to the reverse face for preheating temperature measurement, preheating temperature measurements should be taken on the exposed parent metal surface immediately adjacent to the weld preparation.

D.8 Design assisted by testing

(1)P The provisions of Chapter 8 also apply to steel grades S 460 and S 420.

D.9 Fatigue

(1)P The requirements given in Chapter 9 shall also be satisfied when using steel grades S 460 and S 420.