In de praktijk worden verbindingen meestal beschouwd als stijf of scharnierend. Het werkelijke gedrag ligt echter vaak tussen deze extremen in en het wordt aangeduid als flexibel. Voor het berekenen van flexibele verbindingen met de computer is een volledige beschrijving van de geometrie van de verbindingen nodig. Tijdens het voorontwerp zijn deze gegevens nog niet beschikbaar. Daarom bestaat er tijdens het voorontwerp behoefte aan eenvoudige ontwerpformules om de sterkte, stijfheid en rotatiecapaciteit van de verbindingen vast te stellen. Dit artikel geeft deze ontwerpformules voor het bepalen van de stijfheid.

Flexibele verbindingen in raamwerken

Eenvoudige ontwerpformules beschikbaar voor voorontwerp

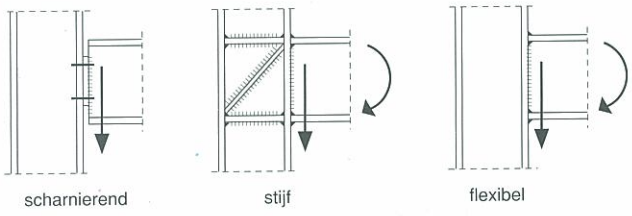
ir. C.M. Steenhuis
TNO Bouw, Rijswijk

ir. A.M. Gresnigt
TU Delft, Faculteit der Civiele Techniek

dipl.ing. K. Weynand
RWTH Aachen

In de meeste Europese landen zijn traditioneel twee partijen verantwoordelijk voor het ontwerp van stalen raamwerken: de constructeur ontwerpt de kolommen en de liggers, en het staalconstructiebedrijf de verbindingen. Dat betekent dat de constructeur de eisen ten aanzien van sterkte, stijfheid en rotatiecapaciteit van de verbindingen bepaalt. Het staalconstructiebedrijf ontwerpt de verbindingen vervolgens zodanig dat aan deze eisen wordt voldaan, rekening houdend met de fabricage.

Voor de bepaling van de krachtsverdeling in een raamwerk wordt in de praktijk meestal de elasticiteitsleer gebruikt. Met scharnierende of stijve verbindingen (*afb. 1*) leidt dit tot een beperkte gegevensstroom tussen constructeur en staalconstructiebedrijf. In het geval van scharnierende verbindingen ontwerpt het staalconstructiebedrijf de verbindingen zodanig dat ze de benodigde rotaties kunnen ondergaan, zonder dat er (significante) momenten tot ontwikkeling komen. In het geval van stijve verbindingen moeten de verbindingen zo stijf zijn dat in de berekening mag worden uitgegaan van een volkomen stijve verbinding. In beide gevallen moeten de verbindingen in staat zijn de krachten over te brengen die volgen uit de raamwerkberekening.
In economisch opzicht verdienen flexibele verbindingen vaak de voorkeur boven scharnierende of stijve verbindingen [1]. De keuze voor flexibele verbindingen leidt echter tot een intensieve gegevensstroom tussen constructeur en staalconstructiebedrijf. Voor de raamwerkberekening heeft de constructeur de stijfheid van de flexibele verbindingen nodig. Deze stijfheid behoort te zijn gebaseerd op de werkelijke geometrie van de verbinding, die echter door het staalconstructiebedrijf wordt bepaald. De intensivering van de communicatie (met de vermenging van verantwoordelijkheden) tussen constructeur en staalconstructiebedrijf bemoeilijkt de acceptatie van flexibele verbindingen in de praktijk. Dit artikel beschrijft een methode om deze bezwaren weg te nemen, waardoor het eenvoudiger wordt verbindingen economisch toe te passen.



1. Voorbeelden van scharnierende, stijve en flexibele verbindingen.

Opzet
Dit artikel is gebaseerd op de nieuwe Eurocode 3 Annex J (herzien) [2], in het vervolg aangeduid als Annex J. Als introductie worden allereerst de belangrijkste verschillen toegelicht tussen Eurocode 3 Annex J en NEN 6772 Bijlage A [3]. Vervolgens wordt ingegaan op het bestaande ontwerpproces voor raamwerken met stijve en scharnierende verbindingen. Dit bestaande proces wordt namelijk gebruikt als basis voor een aangepast ontwerpproces, waarmee ook raamwerken met flexibele verbindingen kunnen worden ontworpen. Deze laatste procedure gaat uit van de bestaande verdeling van verantwoordelijkheden tussen constructeur en staalconstructiebedrijf. Dat heeft de volgende voordelen:
- flexibele verbindingen kunnen worden toegepast zonder toename van de communicatie in vergelijking met de huidige praktijk;
- het staalconstructiebedrijf houdt een zekere vrijheid de verbindingen te ontwerpen met bedrijfseigen technieken en materialen.

De voorgestelde procedure is ook toepasbaar in het geval dat de constructeur zowel het raamwerk als de verbindingen ontwerpt. Een belangrijk element in de procedure is de bepaling van de stijfheid tijdens het voorontwerp, gevolgd door de toets van de stijfheid bij het ontwerp van de verbinding.

Eurocode 3 Annex J
Eurocode 3 Annex J heeft de ENV-status en mag daarom in combinatie met een National Application Document (NAD) worden toegepast in elk Europees land. Annex J moet worden gezien als het Europese syno-

niem van Bijlage A van NEN 6772. Zowel Annex J als Bijlage A zijn voor een belangrijk deel gebaseerd op onderzoek naar kolom/ligger verbindingen dat is verricht door de TU Delft [4]. Er bestaat een grote overeenkomst tussen de rekenregels in de beide documenten. Een uitzondering is de berekening van de stijfheid van de verbinding, die in Annex J is aangepast aan de resultaten van recent onderzoek [5]. *Tabel 1* geeft een overzicht van de belangrijkste verschillen tussen Bijlage A en Annex J.

Eén van de verschillen betreft de componentbenadering die Annex J veel duidelijker hanteert dan Bijlage A. In de componentbenadering kunnen in een verbinding verschillende componenten worden onderscheiden. Van deze componenten (kolomlijf op afschuiving, kopplaat en bouten op trek, enz.) worden de mechanische eigenschappen sterkte, stijfheid en rotatiecapaciteit bepaald. Deze eigenschappen worden – afhankelijk van het verbindingstype, zoals een kopplaatverbinding of een gelaste verbinding – gecombineerd tot de sterkte, stijfheid en rotatiecapaciteit van de gehele verbinding.

Tabel 1. Belangrijkste verschillen tussen NEN 6772 Bijlage A en Eurocode 3 Annex J.

	Bijlage A	Annex J
onderwerp	▮ kolom/ligger verbindingen	▮ kolom/ligger verbindingen ▮ ligger/ligger verbindingen
type	▮ gelast ▮ met kopplaat	▮ gelast ▮ met kopplaat ▮ met flenshoekstaal
presentatie	▮ rekenregels per verbindingstype	▮ componentbenadering
verdeling boutkrachten	▮ plastisch of elastisch	▮ uitsluitend elasto-plastisch
berekening stijfheid	▮ gebaseerd op vervormingen, behorend bij het ontwerpmoment van de verbinding ▮ niet altijd consistent ▮ voorspelde stijfheid kopplaatverbinding lager dan volgens Annex J ▮ voorspelde stijfheid gelaste verbinding hoger dan volgens Annex J	▮ gebaseerd op vervormigen, behorend bij het elastisch stadium ▮ consistent ▮ voorspelde stijfheid kopplaatverbinding hoger dan volgens Bijlage A ▮ voorspelde stijfheid gelaste verbinding lager dan volgens Bijlage A
classificatie	▮ in het classificatiediagram moet de stijfheid worden ingevuld, behorend bij het optredend moment in de verbinding ▮ als veilige benadering mag de stijfheid worden ingevuld, behorend bij de ontwerpsterkte van de verbinding	▮ in het classificatiediagram mag de initiële stijfheid worden ingevuld; dit is de elastische stijfheid behorend bij tweederde van het ontwerpmoment

Ontwerpproces

Scharnierende en stijve verbindingen

Het ontwerpproces van een stalen raamwerk met stijve of scharnierende verbindingen bestaat bij een elastische berekening traditioneel uit de volgende zeven, opeenvolgende stappen:

1. Mechanisch modelleren van het raamwerk in het gebouw, inclusief stijve of scharnierende verbindingen.
2. Bepalen van de belasting en het type verbinding (stijf of scharnierend).
3. Voorontwerp van liggers en kolommen.
4. Bepalen van de krachten en verplaatsingen in het raamwerk.
5. Toetsen van de liggers en kolommen aan de grenstoestanden.
6. Aanpassen, indien nodig, van de liggers en kolommen (vervolg met stap 4).
7. Ontwerp de scharnierende of stijve verbindingen op basis van de benodigde sterkte.

In de modelleringsfase (stap 1) modelleert de constructeur de verbinding doorgaans als scharnierend of stijf. Scharnierende verbindingen moeten in staat zijn de krachten tussen de liggers en kolommen over te brengen, zonder dat er momenten in de verbinding ontstaan die een negatieve invloed hebben op het raamwerkgedrag.
De verschillende belastingen en de stijfheden van liggers en kolommen vormen de invoer voor de raamwerkberekening (stap 4), met als uitvoer de vervormingen van en de krachtsverdeling in het raamwerk. De afmetingen van de liggers en kolommen en de over te brengen krachten in de verbindingen zijn het startpunt voor het ontwerp van de verbindingen (stap 7). Het doel van dit ontwerp is een geometrie te vinden, die de krachten tussen ligger en kolom kan overbrengen. Daarnaast moet het staalconstructiebedrijf in geval van scharnierende verbindingen toetsen of er geen significante momenten in de scharnierende verbindingen ontstaan. Bij stijve verbindingen moet worden getoetst of de verbindingen voldoende stijf zijn.
Er bestaan computerprogramma's die het ontwerp van verbindingen (stap 7) volgens Eurocode 3 en NEN 6772 ondersteunen [6, 7]. Deze programma's zijn essentieel in het ontwerpproces, omdat ze de taak van het staalconstructiebedrijf verlichten. De programma's hebben de geometrie en materiaaleigenschappen van de verbinding als invoer nodig en berekenen de sterkte, stijfheid en rotatiecapaciteit. Een programmagebruiker ontwerpt een verbinding interactief door trial-and-error: hij probeert bijvoorbeeld eerst een eenvoudige onverstijfde oplossing. Als deze oplossing niet voldoet, voegt hij enkele schotten toe, enzovoorts. Als het ontwerp voldoet, eindigt het proces. Sommige programma's kunnen ook toetsen of een verbinding al dan niet stijf is.

Flexibele verbindingen

Het traditionele ontwerpproces wordt voor flexibele verbindingen op twee punten aangepast. Het ontwerpproces voor een berekening volgens de elasticiteitsleer verloopt dan als volgt:

1. Mechanisch modelleren van het raamwerk in het gebouw.
2. Bepalen van de belasting.
3. Voorontwerp van liggers en kolommen en het bepalen van een redelijk nauwkeurige waarde van de stijfheid van de verbindingen.
4. Bepalen van de krachten en verplaatsingen in het raamwerk, rekening houdend met de stijfheid van de verbindingen.
5. Toetsen van de liggers en kolommen aan de grenstoestanden.
6. Aanpassen, indien nodig, van de liggers en kolommen (vervolg met stap 4).
7. Ontwerp de flexibele verbindingen op basis van de benodigde sterkte en stijfheid.

Gebruik verbindingsstijfheid in raamwerkberekening

Cunningham en Taylor [8] hebben een methode voorgesteld om een bepaalde stijfheid voor de verbindingen in de raamwerkberekening op te nemen in plaats van de verbindingen als stijf of scharnierend te beschouwen. Deze stijfheid is een functie van de *liggerstijfheid* en een

Commissie SG/TC10a Verbindingen

De technische commissie TC10a van het Staalbouwkundig Genootschap heeft als doel de toepassing van staal te bevorderen door het genereren en verspreiden van kennis over verbindingen in staalconstructies. De activiteiten van de commissie worden gestuurd vanuit het bedrijfsleven. De commissie houdt zich bezig met de vele aspecten van ontwerp en fabricage van verbindingen, zoals: mechanisch onderzoek, onderzoek naar produktiemethoden, produktontwikeling, ontwerphulpmiddelen en pre-normalisatiewerk. In de commissie TC10a hebben zitting:

prof.ir. J. Berenbak	Hollandia Kloos bv
ir. J.A. Bunkers	dS+V, sector Bouw- en Woningtoezicht Rotterdam, bureau Constructies
H.G.A. Evers (vz.)	ECCS bv
ir. A.M. Gresnigt	TU Delft (Civiele Techniek)
C. de Heer	Technisch Buro de Heer
dr. J.C.D. Hoenderkamp	TU Eindhoven (Bouwkunde/BKO)
prof.ir. J.W.B. Stark	TU Delft (Civiele Techniek)
ir. C.M. Steenhuis (secr.)	TNO Bouw
ir. W. Verburg	Staalbouw Instituut
J.A.L.M. Verhoeven	Hollandia Keizersveer

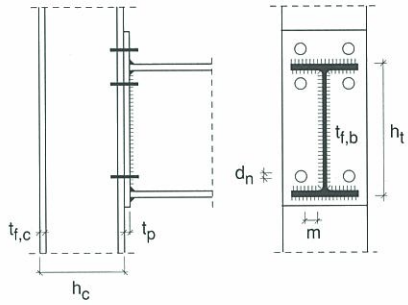
aanbevolen vasthoudfactor (fixity factor). De vasthoudfactor is gedefinieerd als de relatie tussen de stijfheid van de verbinding en die van de ligger: dat is een schatting van de stijfheid van de verbinding die in stap 7 wordt ontworpen.
Als een uitbreiding op het werk van Cunningham en Taylor wordt voorgesteld de stijfheid van de verbindingen tijdens het voorontwerp te relateren aan de *eigenschappen van de ligger en de kolom* en aan het *type van de verbinding* (zie verderop). Deze stijfheid kan worden gebruikt in de raamwerkberekening (stap 4).

Toetsen stijfheid tijdens ontwerp van verbindingen
In stap 7 wordt getoetst of de stijfheid van de verbinding, die is ontworpen door het staalconstructiebedrijf, in redelijke overeenstemming is met de aanname van de stijfheid in de raamwerkberekening. Dit vervangt het toetsen van de stijfheid van stijve en scharnierende verbindingen in het traditionele ontwerpproces. Verderop worden enkele regels gegeven om deze toets uit te voeren. Deze regels zijn gebaseerd op dezelfde achtergronden als de classificatiediagrammen van NEN 6772 en Eurocode 3. In combinatie met een computerprogramma kunnen deze regels eenvoudig worden gebruikt.

Verbindingsstijfheid tijdens voorontwerp
Tijdens het voorontwerp is het lastig de stijfheden van de (flexibele) verbinding te bepalen, omdat de verbinding nog niet is ontworpen! Als hulpmiddel zijn enkele vereenvoudigde formules afgeleid op basis van Eurocode 3 Annex J. Met behulp van deze formules (*tabel 2*) kan de ontwerper een goede schatting van de stijfheid van de verbinding maken, afhankelijk van de detaillering van de verbinding.
De vereenvoudigde formules veronderstellen enkele vaste keuzen voor het ontwerp van de verbinding. Voor kopplaatverbindingen zijn dat:
- de verbinding heeft twee boutrijen in de trekzone.
- de boutdiameter is ongeveer 1,5 keer de dikte van de kolomflens;
- de bout is zo dicht mogelijk geplaatst bij zowel de afrondingsstraal in de kolom als het liggerlijf en de liggerflens (ongeveer 1,5 keer de dikte van de kolomflens);
- de dikte van de kopplaat is ongeveer gelijk aan de dikte van de kolomflens.

Er is uitgegaan van Europese I- en H-profielen met de volgende kenmerken:
- de afrondingsstraal is ongeveer gelijk aan de flensdikte;
- de dikte van het het lijf is ongeveer 0,6 keer de flensdikte;
- de hoogte van het lijf tussen de afrondingsstralen is ongeveer 15 keer de flensdikte.

Ter illustratie wordt een vereenvoudigde formule afgeleid voor een onverstijfde kopplaatverbinding tussen een randkolom en een ligger (*afb. 2*) volgens Annex J. De notaties zijn gekozen volgens Eurocode 3.



2. Flexibele verbinding tussen randkolom en ligger.

Tabel 2. k_x-factoren voor verschillende ligger/kolom-verbindingen.

type	uitvoering	k_x Annex J	k_x Bijlage A
gebout	– uitstekende kopplaat, onverstijfd, enkelzijdig – idem, met flensverstijfde console	13,0	14,0
gebout	– uitstekende kopplaat, onverstijfd, dubbelzijdig, symmetrisch – idem, met flensverstijfde console	7,5	11,0
gebout	– uitstekende kopplaat, verstijfd in trek- en drukzone, enkelzijdig – idem, met flensverstijfde console	8,5	10,0
gebout	– uitstekende kopplaat, verstijfd in trek- en drukzone, dubbelzijdig, symmetrisch – idem, met flensverstijfde console	3,0	7,0
gebout	– uitstekende kopplaat, Morrisverbinding, enkelzijdig	3,0	7,0
gebout	– korte kopplaat, onverstijfd, afdekplaat, enkelzijdig – idem, met flensverstijfde console	11,5	12,0
gebout	– korte kopplaat, onverstijfd, afdekplaat, dubbelzijdig, symmetrisch – idem, met flensverstijfde console	6,0	9,0
gelast	– onverstijfd, enkelzijdig – idem, met flensverstijfde console	11,5	6,0
gelast	– onverstijfd, dubbelzijdig, symmetrisch – idem, met flensverstijfde console	6,0	3,0
gelast	– verstijfd in trek- en drukzone, enkelzijdig – idem, met flensverstijfde console	5,5	3,0
gelast	– verstijfd in trek- en drukzone, dubbelzijdig, symmetrisch – idem, met flensverstijfde console	0	0

▮ *Kolomlijf op afschuiving.* Voor de eenvoud wordt aangenomen h_c/h_t = 0,8. Dit is een redelijke aanname voor ongeschoorde raamwerken.

$$0{,}38\frac{A_{v,c}}{h_t} \approx 0{,}38\frac{0{,}8h_c t_{w,c}}{h_t} \approx 0{,}38\frac{0{,}8h_c 0{,}6t_{f,c}}{h_t} = 0{,}18t_{f,c}$$

▮ *Kolomlijf op druk en trek.* Aangenomen wordt dat de vervorming van het kolomlijf op trek ongeveer gelijk is aan de vervorming op druk. De effectieve breedte b_{eff} van de drukzone, dan wel van de trekzone, is ongeveer:

$$b_{eff} = t_{f,b} + 2t_e + 5(r_c + t_{f,c}) \approx 12t_{f,c}$$

$$\frac{0{,}7\, b_{eff} t_{w,c}}{d} \approx 0{,}7\frac{12t_{f,c}0{,}6t_{f,c}}{15t_{f,c}} = 0{,}33t_{f,c}$$

▮ *Kolomflens en kopplaat op buiging.*

$$0{,}85\frac{\ell_{eff} t_{f,c}^3}{m^3} \approx 0{,}85\frac{12t_{f,c}t_{f,c}^3}{1{,}5^3 t_{f,c}^3} = 3{,}0t_{f,c}$$

▮ *Twee boutrijen op trek.*

$$2\left(1{,}6\frac{A_{b,s}}{\ell_b}\right) \approx 3{,}2\frac{0{,}75\,\frac{1}{4}\pi\, 1{,}5^2 t_{f,c}^2}{3t_{f,c}} = 1{,}4t_{f,c}$$

De initiële (elastische) stijfheid van de verbinding bedraagt hiermee:

$$S_j \approx \frac{Eh_t^2 t_{f,c}}{\frac{1}{0{,}18}+\frac{1}{0{,}33}+\frac{1}{0{,}33}+\frac{1}{3{,}0}+\frac{1}{3{,}0}+\frac{1}{1{,}4}} = \frac{1}{13{,}0}Eh_t^2 t_{f,c}$$

Deze formule voor de stijfheid kan worden gegeneraliseerd tot:

$$S_j = \frac{1}{k_x}Eh_t^2 t_{f,c}$$

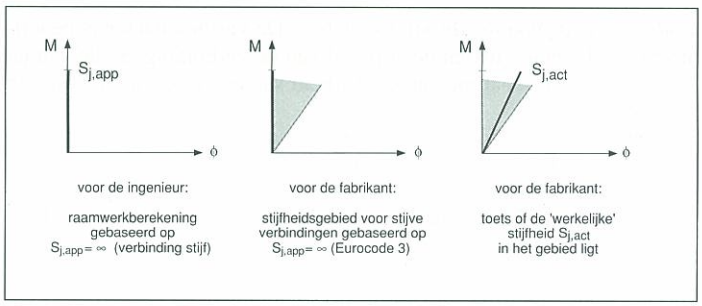
Hierin is:
k_x factor afhankelijk van de gekozen detaillering (*tabel 2*);
h_t afstand tussen het drukpunt van de verbinding en het midden van de bouten in de trekzone. Bij een verbinding met een uitstekende kopplaat is deze afstand ongeveer gelijk aan de liggerhoogte. Bij een soortgelijke verbinding met een flensverstijfde console is h_t gelijk aan de som van liggerhoogte en consolehoogte;
$t_{f,c}$ dikte van de kolomflens.

Verstijvingsschotten en consoles hebben een aanzienlijke invloed op de stijfheid.

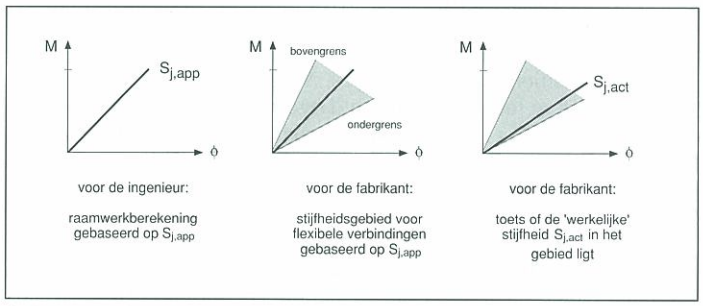
Vereiste stijfheid
Eurocode 3 geeft twee diagrammen om verbindingen te classificeren naar stijfheid (scharnierend, flexibel, stijf): één voor geschoorde en één voor ongeschoorde raamwerken. Een verbinding in een geschoord raamwerk is stijf, indien voor de initiële stijfheid geldt:

$$S_j \geq \frac{8EI_b}{\ell}$$

De achtergrond van deze formule is dat de draagkracht van het raamwerk ten hoogste 5% mag afnemen als gevolg van een verschil in stijfheid tussen de aangenomen verbindingsstijfheid in de raamwerkberekening ($S_j = \infty$) en de 'werkelijke' stijfheid [9]. Onder de 'werkelijke' stijfheid wordt hier verstaan: de beste (ontwerp)waarde die een ontwerper voor de stijfheid van een bepaalde verbinding kan krijgen. Deze waarde kan zijn gebaseerd op een proef of zijn berekend met een norm. Als het verschil tussen de aangenomen en de 'werkelijke' stijfheid een beperkt effect heeft op het gedrag van het raamwerk, is het niet nodig een tweede raamwerkberekening met de 'werkelijke' verbindingsstijfheid uit te voeren. Uitgaande van een oneindig stijve verbinding bestaat de toets of een verbinding stijf is uit twee delen (*afb. 3*):



3. Toets van de stijfheidseis voor een stijve verbinding volgens Annex J.



4. Toets van de stijfheidseis voor een flexibele verbinding.

Tabel 3. Grenzen voor het verschil tussen de 'werkelijke' en de benaderde stijfheid van een flexibele verbinding.

ondergrens	bovengrens		(*geschoordraamwerk*)
$S_{j,act} \geq \frac{8S_{j,app}EI_b}{10EI_b + S_{j,app}\ell}$	$S_{j,act} \leq \frac{10S_{j,app}EI_b}{8EI_b - S_{j,app}\ell}$	voor	$S_{j,app} \leq \frac{8EI_b}{\ell}$
	$S_{j,act} \leq \infty$	voor	$S_{j,app} > \frac{8EI_b}{\ell}$
ondergrens	bovengrens		(*ongeschoordraamwerk*)
$S_{j,act} \geq \frac{24S_{j,app}EI_b}{30EI_b + S_{j,app}\ell}$	$S_{j,act} \leq \frac{30S_{j,app}EI_b}{24EI_b - S_{j,app}\ell}$	voor	$S_{j,app} \leq \frac{24EI_b}{\ell}$
	$S_{j,act} \leq \infty$	voor	$S_{j,app} > \frac{24EI_b}{\ell}$

– bepalen van het gebied waarbinnen de 'werkelijke' stijfheid moet vallen;
– toetsen of de 'werkelijke' stijfheid in het bewuste gebied ligt.

Deze toets kan zo worden veralgemeniseerd, waardoor de invloed van een verschil tussen aangenomen en 'werkelijke' stijfheid van flexibele verbindingen op het raamwerkgedrag kan worden beoordeeld (*afb. 4*). De bijbehorende formules staan in *tabel 3*; ze mogen worden gebruikt om na te gaan of een verschil tussen de aangenomen verbindingsstijfheid en de 'werkelijke' stijfheid in de raamwerkberekening een voldoende beperkt effect (<5%) heeft op het draagvermogen van het raamwerk. Voor de grootheden in de formules geldt:
$S_{j,app}$ aangenomen stijfheid bij de raamwerkberekening (benadering van de 'werkelijke' stijfheid);
$S_{j,act}$ 'werkelijke' stijfheid van de verbinding;
E elasticiteitsmodules;
ℓ liggerlengte;
I_b traagheidsmoment van de ligger.

Vergelijking met stijfheidsmodel van Annex J
De voorspelde stijfheden volgens *tabel 2* zijn vergeleken met de stijfheden volgens Annex J voor vijf verschillende verbindingen. De stijfheid volgens Annex J wordt in dit geval gezien als de 'werkelijke' stijfheid. Wald en Steenhuis geven een volledige geometrische beschrijving van deze zes verbindingen [10]. *Tabel 4* en *tabel 5* geven voor deze zes verbindingen achtereenvolgens:
– de benadering van de stijfheid volgens *tabel 2* (stap a);
– het gebied waarin de Eurocode 3-voorspelling moet liggen, indien de raamwerkberekening is uitgevoerd met een benadering van de stijfheid volgens *tabel 2* (stap b);

– de 'werkelijke' stijfheid, voorspeld met Annex J en een toets of deze 'werkelijke' stijfheid in het gebied ligt (stap c).

De beide tabellen laten een goede overeenkomst zien tussen de voorspelling gebaseerd op *tabel 2* en Annex J.

Tabel 4. Vergelijking van stijfheden in kNm/mrad (kilonewton meter per milliradiaal) voor een geschoord raamwerk met een liggeroverspanning $\ell = 20\ h_b$.

	variant				
	1	2	3	4	5
benaderde stijfheid (stap a)	44	61	86	59	59
stijfheidsgebied (stap b)	20-591	24-∞	46-259	23-∞	23-∞
'werkelijke' stijfheid volgens Annex J	53	82	59	59	60
toets (stap c)	OK	OK	OK	OK	OK

Tabel 5. Vergelijking van stijfheden in kNm/mrad (kilonewton meter per milliradiaal) voor een ongeschoord raamwerk met een liggeroverspanning $\ell = 15h_b$ (In dit geval moet de 'werkelijke' stijfheid in de raamwerkberekening worden ingevoerd).*

	variant				
	1	2	3	4	5
benaderde stijfheid (stap a)	28	38	54	38	38
stijfheidsgebied (stap b)	20-40	26–59	40-74	26-59	26-59
'werkelijke' stijfheid volgens Annex J	27	35	37	33	33
toets (stap c)	OK	OK	niet OK*	OK	OK

Voorbeeld

Het voorbeeld in *afbeelding 5* toont het effect van de stijfheid van een verbinding op de vervormingen en de krachtsverdeling in een ongeschoord raamwerk volgens een eerste-orde elastische raamwerkberekening. De overspanning van de ligger bedraagt 6 m en de kolomhoogte 4 m. De kolommen en de ligger zijn profielen IPE 360. De belasting bestaat uit een horizontale belasting (F = 12,5 kN) en een gelijkmatig verdeelde verticale belasting (q = 20 kN/m).

Tabel 6 geeft de krachtsverdeling en de vervormingen in het raamwerk voor twee verschillende verbindingen, die beide stijf zijn volgens Eurocode 3. Een stijfheid $S_j = 25EI_b/\ell = 140$ kNm/mrad is de laagste waarde die nog als stijf mag worden beschouwd. Vergeleken met een theoretisch stijve verbinding ($S_j = \infty$), verschillen de verticale vervormingen δ_v ongeveer 10% en de horizontale vervormingen δ_h ongeveer 20%. Hoewel het verschil in momenten groter is dan 5%, is aangetoond dat de draagkracht van het raamwerk minder dan 5% afneemt [9].

Tabel 7 toont de krachtsverdeling en de vervormingen voor een flexibele verbinding met een stijfheid $S_j = 60$ kNm/mrad. Deze tabel geeft ook vervormingen en krachten voor $S_j = 35$ kNm/mrad en $S_j = 130$ kNm/mrad. Deze stijfheden zijn de onder- en bovengrens voor de stijfheid volgens *tabel 3*, indien in de raamwerkberekening een stijfheid is aangenomen van $S_{j,app} = 60$ kNm/mrad. Vergelijken we het geval $S_j = 60$ kNm/mrad met $S_j = 35$ kNm/mrad of $S_j = 130$ kNm/mrad, dan bedragen de verschillen in verticale vervormingen 10% en die in horizontale vervormingen 20%. De vervormingsverschillen in *tabel 6* zijn in overeenstemming met die in *tabel 7*.

Tabel 6. Vergelijking tussen raamwerken met verschillende stijve verbindingen (met verstijfd kolomlijf). In overeenstemming met Eurocode 3 Annex J is in de raamwerkberekening voor de stijfheid niet de initiële stijfheid S_j gebruikt, maar $0{,}5S_j$.

stijfheid (kNm/mrad)	$S_j = 140$ ondergrens	$S_j = \infty$ benadering
verplaatsing δ_v	4,9 mm	4,4 mm
verplaatsing δ_h	8,3 mm	6,8 mm
moment M_A	12,3 kNm	16,5 kNm
moment M_B	52,7 kNm	48,5 kNm
moment M_C	62,3 kNm	66,5 kNm

Tabel 7. Vergelijking tussen raamwerken met verschillende stijfheden voor flexibele verbindingen (met onverstijfd kolomlijf). In overeenstemming met Eurocode 3 Annex J is in de raamwerkberekening voor de stijfheid niet de initiële stijfheid S_j gebruikt, maar $0{,}5S_j$.

stijfheid (kNm/mrad)	$S_j = 35$ ondergrens	$S_j = 60$ benadering	$S_j = 130$ bovengrens
verplaatsing δ_v	6,0 mm	5,4 mm	4,9 mm
verplaatsing δ_h	12,7 mm	10,2 mm	8,3 mm
moment M_A	3,4 kNm	7,9 kNm	12,1 kNm
moment M_B	61,6 kNm	57,1 kNm	52,9 kNm
moment M_C	53,4 kNm	57,9 kNm	62,1 kNm

Het model waarmee kan worden getoetst of de flexibiliteit van een verbinding in overeenstemming is met de aanname in de raamwerkberekening, is dus even nauwkeurig als het model volgens Eurocode 3 om te toetsen of een verbinding stijf is.

Conclusies

Dit artikel laat zien hoe flexibele verbindingen eenvoudig kunnen worden toegepast in de normale ontwerppraktijk door het traditionale ontwerpproces aan te passen. Hierbij zijn de verantwoordelijkheden tussen constructeur en staalconstructiebedrijf gelijk aan die in de huidige praktijk, waarin bij het ontwerp uitsluitend wordt uitgegaan van scharnierende of van stijve verbindingen.

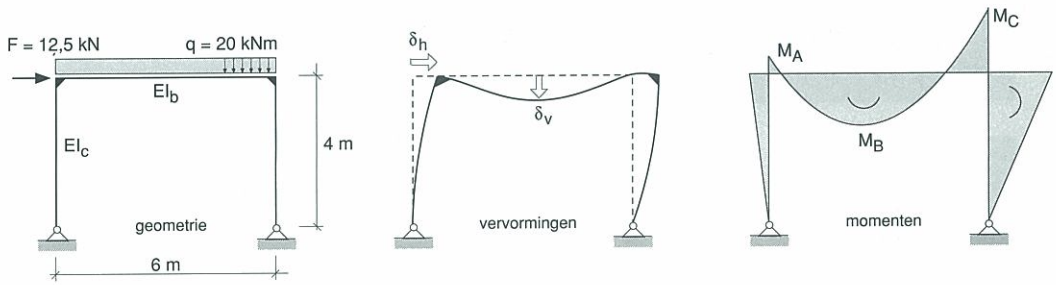
Het aangepaste ontwerpproces geeft een goede benadering van de verbindingsstijfheid voor invoering in de raamwerkberekening. Eenvoudige formules, gebaseerd op Eurocode 3 Annex J, zijn daarvoor beschikbaar. De toets of een stijve verbinding voldoende stijf is, kan eenvoudig worden uitgebreid naar flexibele verbindingen. Bij deze toets moet het verschil tussen de benadering en de 'werkelijke' stijfheid binnen bepaalde grenzen vallen. Deze grenzen hangen af van het type raamwerk, de liggeroverspanning, de liggerstijfheid en de verbindingsstijfheid.

Het voornemen bestaat om de factoren k_x van *tabel 2* te vergelijken met gegevens van uitgevoerde proeven. Wellicht dat zal blijken dat de stijfheidstoets als beschreven in *afbeelding 4* voor bepaalde typen verbindingen kan worden weggelaten. De verwachting is dat dit met name geldt voor verbindingen in geschoorde raamwerken.

Literatuur

1. C, Dol en C,M, Steenhuis, 'Geboute kopplaatverbindingen', *Bouwen met Staal* 103 (1991), p. 3-7.
2. *ENV 1993-1-1* (Eurocode 3. Design of Steel Structures), april 1992, met revised annex J (Joints in building frames), juni 1994.
3. *NEN 6772* (TGB 1990. Staalconstructies. Verbindingen), 1991, bijlage A (Ligger/kolom verbindingen).

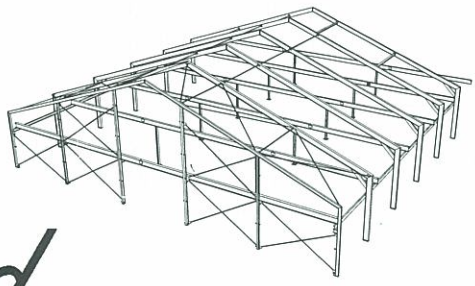
5. Voorbeeld van een éénbeukig raamwerk met één verdieping.



4. P. Zoetemeijer, *Samenvatting van het onderzoek naar geboute kopplaatverbindingen*, rapport 6-85-7, TU-Delft 1985.
5. K. Weynand, J.P. Jaspart en C.M. Steenhuis, 'The stiffness model of revised Annex J', *Proceedings third international workshop on connections in steel structures*, Trento 1995 (publikatie verwacht in 1995).
6. J. Brozzetti, 'Design of connections in the Eureka 'Cimsteel' project', in: R. Bjorhovde, A. Colson, G. Haaijer en J. Stark (editors), *Proceedings second international workshop on cConnections in structural steel*, uitgave AISC, Chicago 1992, p. 254-262.
7. C.M. Steenhuis, C. Dol en L. van Gorp, 'Computerised calculation of force distributions in bolted end-plate connections according to Eurocode 3', in: *Journal of Constructional Steel Research* Vol. 31, 1994, p. 135-144.
8. R. Cunningham en C. Taylor, 'Practical design allowing for semi-rigid connections', in: R. Bjorhovde, A. Colson, G. Haaijer en J. Stark (editors), *Proceedings second international workshop on connections in structural steel*, uitgave AISC, Chicago 1992, p. 380-390.
9. F.S.K. Bijlaard en C.M. Steenhuis, 'Prediction of the influence of connection behaviour on the strength, deformations and stability of frames, by classification of connections', in: R. Bjorhovde, A. Colson, G. Haaijer en J. Stark (editors), *Proceedings second international workshop on connections in structural steel*, uitgave AISC, Chicago 1992, p. 307-318.
10. F. Wald en C.M. Steenhuis, 'The beam-to-column bolted joint stiffness according to Eurocode 3', in: *Proceedings first COST C1-workshop*, Straatsburg 1993, p. 503-516.
11. C.M. Steenhuis, A.M. Gresnigt en K. Weynand, 'Pre-design of semi-rigid joints in steel frames', *Proceedings second state of the art workshop semi-rigid behaviour of civil engineering structural connections*, Prague 1994, p. 131-140.

Dit artikel is een bewerking van een bijdrage aan de 'Second state of the art workshop semi-rigid behaviour', gehouden in Praag, oktober 1994 [11].

En wie maakt de werktekeningen .....



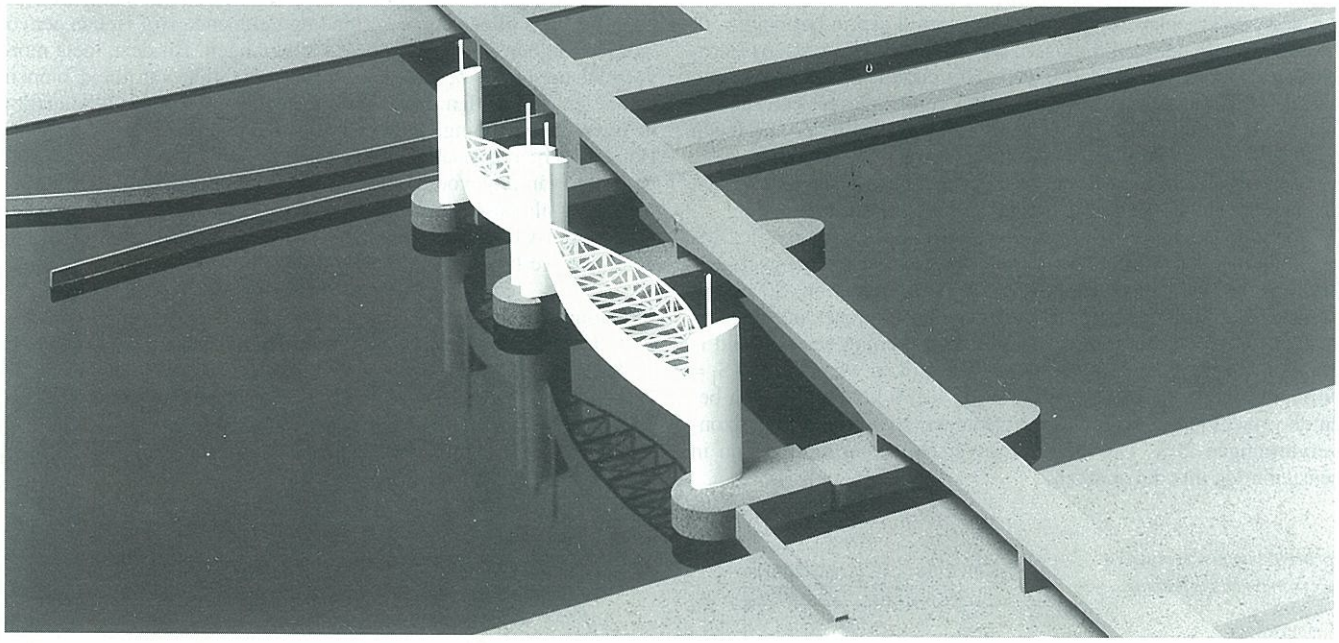
Tekenwerk met Strucad 3D-modelleer software :

- Kompleet, overzichtelijk en foutloos
- Uitgebreide materiaal- en boutenlijsten
- Montagetekeningen in perspectief
- Kostenbesparend

d/h technisch buro c de heer bv adviesburo voor beton- en staalconstructies
Westhavenkade 87 3133 AV Vlaardingen Tel. 010 - 434.28.46 Fax. 010 - 435.81.63

Hollandia

LUBBERS' CONSTRUCTIEWERKPLAATS
EN MACHINEFABRIEK HOLLANDIA BV
Postbus 12
2920 AA Krimpen aan den IJssel (Holland)
Telefoon 01807-1 41 44 — Telex 21571 hocon
Telefax 01807-1 99 56



Stormvloedkering in het Hartelkanaal