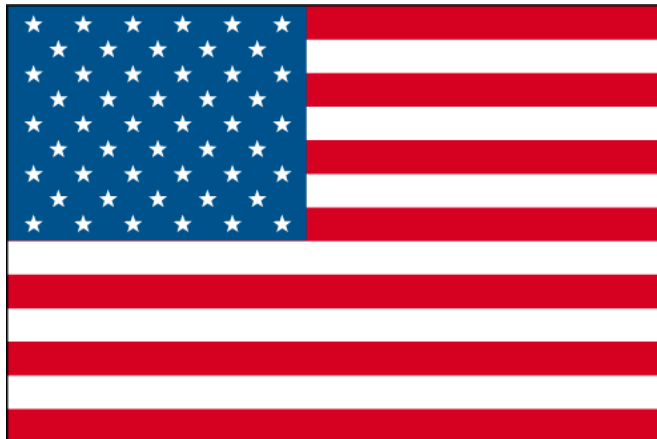


*Een onderzoek naar de verschillen tussen twee
raamwerkprogramma's en twee toetsingcriteria
met betrekking tot het knikprobleem*



*Naam: Matthieu van der Grinten
Studienummer: 1186442
Datum: 23-10-2007*

Voorwoord

Dit is een rapport voor het bachelor eindwerk van Civiele techniek. Het onderzoek is gedaan naar aanleiding een gegeven onderzoeksvraag, Leid stabiliteitskrommen af voor de reductie van de stijfheid van kolommen op basis van de Nederlandse en Europese normen. Vergelijk deze met de krommen die in de USA worden gebruikt. Mijn bachelor eindwerk heb ik gedaan van een breder begin perspectief. Namelijk de verschillen te onderzoeken in de raamwerkprogramma's en toetsingscriteria te onderzoeken met betrekking tot stabiliteit.

In mijn onderzoek is gebleken dat een inzicht in beide codes nodig om een goede vergelijking van de raamwerkprogramma's te kunnen doen. Uiteindelijk heb ik ook een redelijke link gekregen op de originele onderzoeksvraag. Ik heb namelijk gevonden dat maken van stabiliteitskrommen van de Europese normen, zoals wel van de Amerikaanse code afgeleid kunnen worden, niet eenvoudig is.

Het rapport is opgedeeld in twee grote delen. Één over de codes en één over de raamwerkprogramma's. Daarnaast sluit het rapport met een opsomming van de conclusies en aanbevelingen.

Tot slot wil ik bij deze mijn begeleiders, de heer Hoogenboom en de heer Abspoel, bedanken voor hun hulpvaardigheid en expertise. Hun kamer stond bijna altijd open en meestal kwam ik wijzer van een gesprekje met hun terug. Dank dus hiervoor. Ik hoop dat er nog wat met de conclusies en aanbevelingen gedaan kan worden.

Met vriendelijke groet,

Matthieu van der Grinten.

Inhoudsopgave

1. Inleiding.....	1
2. Toetsingscriteria.....	3
2.1 Eurocode 3.....	4
2.2 The AISC Specifications.....	8
2.3 Vergelijking.....	15
2.4 Voorbeelden.....	17
3. De Raamwerkprogramma's.....	20
3.1 MatrixFrame.....	20
3.2 Dr. Frame.....	25
3.3 Vergelijking.....	30
3.4 Voorbeelden.....	32
4. Conclusies en aanbevelingen.....	34
5. Verantwoording.....	36

1. Inleiding

Dat voor het zelfde probleem in verschillende delen van de wereld andere oplossingen gevonden worden is bekend. Denk alleen maar de eenheden in de VS en de rest van de wereld, de HD-DVD en de blueray of het rechts danwel links rijden. Door concurrentie, cultuurverschillen, traditie en andere oorzaken zijn de meeste gevallen logisch te verklaren en komt er onder invloed van de steeds meer globaliserende markt uiteindelijk meestal een wereldstandaard.

Je zou echter verwachten dat voor fundamentele technische vraagstukken in de westerse wereld op de zelfde wijze problemen oplost. Dit blijkt toch ook niet altijd het geval. Een geval als deze is het knik probleem. Het blijkt dat er duidelijke verschillen zijn tussen de oplossingswijze in de VS en in Europa.

De analytische basis is in beide contingenten het zelfde, gebaseerd op de elasticiteit theorie van Timoshenko en Gere. Vanuit deze theorie zijn in beide continenten codes en raamwerkprogramma's gemaakt om ingenieurs en constructeurs te ondersteunen. Het blijkt dat in beide gevallen er sterke verschillen zijn. De vraag is nu hoe ver de twee technologisch geavanceerde contingenten op dit gebied nu uit elkaar liggen.

Codes

In de codes voor het knik probleem is er een presentatie gekozen waardoor op het eerste oog de codes sterk van elkaar lijken te verschillen. Na iets betere bestudering blijkt echter al dat veel van de componenten uit de eurocode terug te vinden zijn in de Amerikaanse ASD/LRFD codes. De vraag die dan blijft of er toch nog verschillen over blijven en of dan misschien wel één mooier is dan de ander.

Raamwerkprogramma's

Er zijn in de wereld vele raamwerkprogramma's in omloop. Deze worden niet alleen in alle werelddelen gemaakt, maar misschien is nog wel belangrijker dat ze voor andere doeleinde gebruikt worden. Twee bekende programma's zijn martixframe en dr.frame. De ene uit Europa geschreven als assistentie voor professionele constructeurs en de andere uit de Verenigde Staten geschreven naar aanleiding van een onderwijs en onderzoeksprogramma op een universiteit. Beide programma's blijken andere methode te gebruiken voor het bepalen van de tweede-orde effecten. Waarom is dat zo en wat zijn de gevolgen voor de uitkomsten. Misschien is de één wel beduidend beter dan het andere programma.

Aanpak

Is het daadwerkelijk zo dat ingeneurs op het ene contingent het knikprobleem anders zijn dan op het andere. Deze vraag oplossen vergt meer dan slechts naar twee verschillende codes kijken en twee raamwerkprogramma's. Het kan daarin

tegen wel een indicatie geven en misschien al een suggestie geven waarom er verschillen zijn.

Dit rapport is bestaat uit drie delen. De toetsingscriteria, de raamwerkprogramma's en de conclusie. In de eerste twee delen wordt eerst dieper ingegaan op de twee te vergelijken onderdelen. Daarna worden vergeleken en tot slot worden er een paar voorbeeld berekeningen gedaan.

2. Toetsingscriteria

2.1 Eurocode 3

In Europa had elk land van oudsher zijn eigen normen, zo had Nederland bijvoorbeeld de NEN-normen. Deze normen hadden niet alleen een andere naam, maar waren fundamenteel anders. In de laatste twintig jaar is hier een langzame maar zekere verandering in gekomen veranderen. Naar aanleiding van het verdrag van Rome, een verdrag werd in 1957 getekend en de ondertekenaars verplichten om te werken aan vrijheid van handel in goederen en diensten binnen de EEG. Het duurde daarna tot 1975 voordat, naar aanleiding van artikel 95 van het verdrag, de Europese Commissie besloot een programma op te zetten om technische barrières voor handel weg te halen en technische specificaties te harmoniseren. Dit leidde tot de eerste eurocodes in de tachtiger jaren. Deze waren voor de leden van de EEG (later EU) echter nog niet bindend van aard, maar slechts adviserend. De volgende stap werd genomen in 1989. De Europese Commissie gaf in dat jaar de rechten voor vervaardiging en publicatie over aan de CEN, Comité Européen de Normalisation. De overeenkomst besloeg ook dat de eurocodes de status van standaard konden krijgen voor richtlijnen gemaakt voor zowel voor constructie producten als werken. Dit betekende dat lidstaten hun eigen normen in de toekomst minstens zo zouden moeten aanpassen dat hun eigen normen in ieder geval aan de eurocodes voldoen. Er moest echter nog zeer veel gebeuren voordat voor het hele constructie vlak eurocodes beschikbaar konden zijn. In 1990 heeft de CEN de CEN/TC 250 opgericht, een commissie van wijze ingenieurs uit heel Europa met de taak al die eurocodes te ontwikkelen. Zij hebben eerst eurocodes in de vorm van pre-normen ontwikkeld en op dit moment worden voor het hele constructievlak bindende eurocodes ontwikkeld. Er zijn nu dan ook al vele eurocodes beschikbaar en veel nationale normen zijn er al op aangepast. In 2010 dienen alle landen lid van de unie hun normen te hebben aangepast aan de eurocodes. Dan zullen dus in heel europa de zelfde bindende normen gelden.

Eurocode 0: Grondslag van het constructief ontwerp

In de Eurocode 0 wordt het hoe en waarom van de eurocodes beschreven. Er staat in beschreven hoe de eurocodes zijn ontstaan, maar bijvoorbeeld ook waarop een constructie berekend moet zijn. Zo wordt het verschil tussen de uiterste en gebruikstoestand nader verklaard. Hiernaast wordt uiteengezet dat de sterkte groter moet zijn dan de belasting en dat op zowel de belasting als het materiaal een veiligheidsfactor in acht moet worden genomen. De factoren van de materialen komen in specifieke eurocodes van dat materiaal aan de orde. Voor de factoren op de belastingen is in de eerste annex een raamwerk gegeven. Aan het raamwerk dient gehouden te worden. Het raamwerk komt neer op dat belastingen worden onderverdeeld in drie groepen; een permanenten (gunstig of ongunstig), een leidende variabele belasting en een bijkomende variabele belasting. Voor elke van deze gevallen zijn belastingfactoren gegeven, deze

variëren van 0.9 tot 1.5. Deze factoren zijn echter slechts adviezen, elk land mag hier nog steeds van afwijken.

De te gebruiken belasting wordt verder gespecificeerd in eurocode 1. Voor het doorrekenen van de constructies wordt daarna verder verwezen naar materiaal afhankelijke eurocodes. Zo is er de eurocode 2 voor betonconstructies en eurocode 3 voor de toetsingsregels voor staalconstructies.

Eurocode 3,1-1: Staalconstructies-Algemeen

De toetsing volgens de eurocode 3 gebeurt als volgt.

$$\frac{S_{Ed}}{R_b} \leq 1.0$$

Waarin

S_{Ed} = een kracht/moment/spanning met de boven genoemde belastingen factoren verwerkt

R_b = een weerstand die compatibel met de kracht/moment/spanning boven de breuk streep. Deze weerstand wordt bepaald met toetsingsregels.

Door de variatie in de sterkte van constructiestaal te kunnen garanderen zitten er in de toetsingsregels in de eurocode 3 veiligheidsfactoren. Bij elementen zijn er drie verschillende gegeven voor even zo veel mogelijke toetsingsregels,

γ_{m0} = Weerstand van de doorsnede,

γ_{m1} = Weerstand tegen instabiliteit van een constructie element bij beschouwing van het hele element,

γ_{m2} = Weerstand van de doorsnede tegen breken op trek.

Uit onderzoeken blijkt dat de kwaliteit van het staal de laatste jaren eigenlijk altijd minstens zijn nominale sterkte heeft. Hierom heeft de CEN/TC 250 besloten dat voor de toetsingsregels waarin γ_{m0} en γ_{m1} gebruikt worden eigenlijk volstaan zonder een extra veiligheidsfactor. Vandaar dat deze factoren in de huidige eurocode 3 een waarde hebben van 1.0. γ_{m2} heeft echter nog steeds wel een waarde van 1.2.

Weerstand tegen het knik gedrag van uniform op druk belaste constructie elementen

De toetsing op knikstabiliteit gebeurt in de eurocode 3 door bij de toetsing van de drukkracht, door middel van de volgende hoofdregel.

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1.0$$

Waarin

N_{Ed} = nominale drukkracht op een constructie-element

$N_{b,Rd}$ = nominale normaalsterkte van het constructie-element welke gegeven wordt door,

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} \quad \text{voor doorsnede klasse 1,2,3}$$

En

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} \quad \text{voor doorsnedeklasse 4}$$

Waarin

χ = de knikreductiefactor

γ_{M1} = de veiligheidsfactor (=1.0)

f_y = de vloeispanning

A = de gehele oppervlakte van een doorsnede

A_{eff} = de effectieve oppervlakte van een doorsnede

Internal compression parts			
Class	Part subject to bending	Part subject to compression	Part subject to bending and compression
Stress distribution in parts (compression positive)			
1	$c/t \leq 72\epsilon$	$c/t \leq 33\epsilon$	when $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{396\epsilon}{13\alpha - 1}$ when $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36\epsilon}{\alpha}$
2	$c/t \leq 83\epsilon$	$c/t \leq 38\epsilon$	when $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{456\epsilon}{13\alpha - 1}$ when $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5\epsilon}{\alpha}$
Stress distribution in parts (compression positive)			
3	$c/t \leq 124\epsilon$	$c/t \leq 42\epsilon$	when $\psi > -1$: $c/t \leq \frac{42\epsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ when $\psi \leq -1$: $c/t \leq 62\alpha(1 - \psi)\sqrt{(-\psi)}$
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275
	ϵ	1,00	0,92
			0,81
			0,75
			0,71

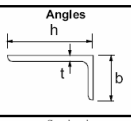
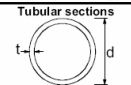
^{*)} $\psi \leq -1$ applies where either the compression stress $\sigma \leq f_y$ or the tensile strain $\epsilon_y > f_y/E$

tabel 2.1, Tabel 5.2 (1/3) uit de Eurocode 3

Doorsnedeklasse

De eurocode 3 geeft vier mogelijke klassen voor een doorsnede,

1. Plastische doorsnede zijn die doorsnede waar een plastisch scharnier gevormd kan worden met een rotatiecapaciteit groot genoeg voor een plastische analyse zonder reductie van sterkte.
2. Gedrongen of semi-plastische doorsnede zijn doorsnede waar het plastische moment gevormd kan worden, maar door een limiteerde rotatiestijfheid hebben door welving.
3. Semi-gedrongen of elastische doorsnede zijn doorsnede waar de spanning in de extreme druk vezels van de doorsnede, uitgaande van herverdeling van spanning, de vloeispanning kunnen bereiken. Welving verhindert de doorsnede van het hebben van plastische moment sterkte.
4. Slanke doorsnede zijn doorsnede waar welving ervoor zorgt dat delen van de doorsnede de vloeispanning niet kunnen bereiken.

		Angles				
Refer also to "Outstand flanges" (see sheet 2 of 3)		Does not apply to angles in continuous contact with other components				
Class	Section in compression					
Stress distribution across section (compression positive)						
3	$h/t \leq 15\epsilon; \frac{b+h}{2t} \leq 11,5\epsilon$					
						
Tubular sections						
Class	Section in bending and/or compression					
1	$d/t \leq 50\epsilon^2$					
2	$d/t \leq 70\epsilon^2$					
3	$d/t \leq 90\epsilon^2$					
NOTE For $d/t > 90\epsilon^2$ see EN 1993-1-6.						
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71
	ϵ^2	1,00	0,85	0,66	0,56	0,51

tabel 2.3, Tabel 5.2 (3/3) uit de Eurocode 3

Outstand flanges															
															
Rolled sections		Welded sections													
Class	Part subject to compression	Part subject to bending and compression													
		Tip in compression	Tip in tension												
Stress distribution in parts (compression positive)															
1	$c/t \leq 9\epsilon$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$												
2	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$												
Stress distribution in parts (compression positive)															
3	$c/t \leq 14\epsilon$	$c/t \leq 21\epsilon\sqrt{k_\sigma}$													
For k_σ see EN 1993-1-5															
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	<table><tr><td>f_y</td><td>235</td><td>275</td><td>355</td><td>420</td><td>460</td></tr><tr><td>ϵ</td><td>1,00</td><td>0,92</td><td>0,81</td><td>0,75</td><td>0,71</td></tr></table>	f_y	235	275	355	420	460	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71		
f_y	235	275	355	420	460										
ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71										

tabel 2.2, Tabel 5.2 (2/3) uit de Eurocode 3

Voor de weerstand van een element tegen knikgedrag is eigenlijk alleen van belang of het constructie element in klasse 4 zit. Voor de classificatie van een doorsnede geeft eurocode een tabel, zie tabel 2.1, 2.2 en 2.3.

Nadat is bepaald of de doorsnede in klasse 4 zit, kan de reductiefactor worden berekend met de volgende toetsingsregel,

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^{-2}}} \quad \text{met } \chi \leq 1.0 \text{ en}$$

Waarin

$$\Phi = 0.5 \left[1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2 \right]$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}}$$

voor doorsnee klasse 1,2 en 3

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}}$$

voor doorsnee klasse 4

α = de instabiliteitsfactor, hangt af van de te toepassen curve

$$N_{cr} = \sqrt{\pi^2 \frac{EI_y}{L_{cr}^2}}$$

Met

L_{cr} = de kniklengte van het constructie element

f_y = de representatieve vloeispanning

Knikcurven

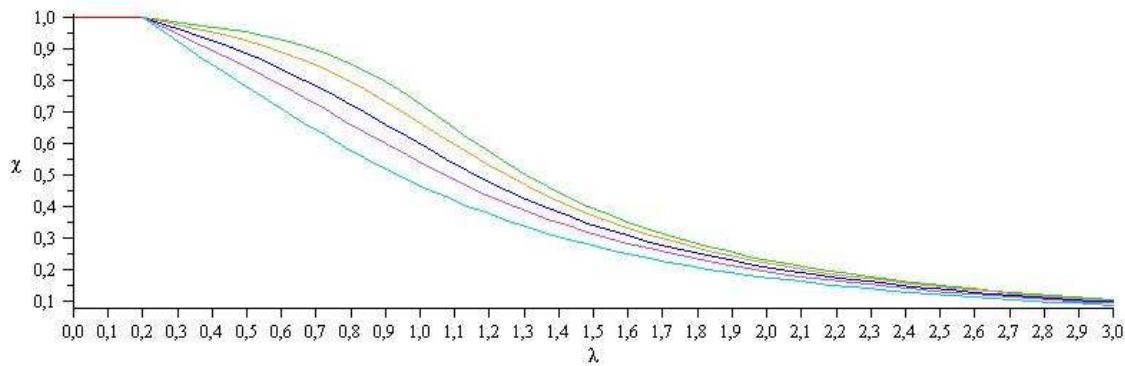
Als je de verhouding tussen χ en $\bar{\lambda}$ mooi in een grafiek weer zou willen geven is het nodig om eerst instabiliteitsfactor een waarde toe te kennen. In de eurocode 3 is er voor gekozen om dit in vijf stappen te doen. Welke factor toegepast wordt is afhankelijk van de classificatie van de dwarsdoorsnede van het constructie-element en de sterkte van het gebruikte constructie staal, zie tabel 2.4. Aan de hand van de deze tabel krijgt de instabiliteitsfactor de volgende waarde,

$\alpha = 0.13$	voor a_0
$\alpha = 0.21$	voor a
$\alpha = 0.34$	voor b
$\alpha = 0.49$	voor c
$\alpha = 0.76$	voor d

Cross section		Limits	Buckling about axis	Buckling curve	
				S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
Rolled sections		$h/b > 1.2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y - y z - z	a b a_0
			$40 \text{ mm} < t_f \leq 100$	y - y z - z	b c a
		$h/b \leq 1.2$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	y - y z - z	b c a
			$t_f > 100 \text{ mm}$	y - y z - z	d d c
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_0
		cold formed	any	c	c
Welded box sections		generally (except as below)	any	b	b
		thick welds: $a > 0.5t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$	any	c	c
U-, T- and solid sections			any	c	c
L-sections			any	b	b

tabel 2.4, Tabel 6.2 uit de Eurocode 3

Als van de vijf instabiliteitsfactoren bekend zijn is χ uit te zetten tegen $\bar{\lambda}$. De knikcurven die op deze wijze ontstaan, kan het bepalen van de χ aanzienlijk versnellen (zie figuur 2.1).



figuur 2.1, het knikdiagram volgens de eurocode

2.2 The AISC Specifications

ANSI

Het ANSI is een private, non-profit organisatie dat de door de private sector geleide “voluntary standardization and conformity and assessment” systeem administreert en coördineert. Eén van de taken die daaruit voortvloeit is dat het ANSI de enige is die accreditatie mag verlenen aan “Standard Developing Organisations” (SDOs) voor het maken van American Nation Standards”. Zelf maakt het ANSI dus geen richtlijnen, maar het erkent verschillende sectoren organisaties/instituten die dat doen.

AISC

Het instituut dat de nationale richtlijnen voor staal constructies produceert in de Verenigde Staten is het American Institute of Steel Constructions, hierna AISC genoemd. Op de website van AISC is de missie van het instituut te lezen.

“AISC, headquartered in Chicago, is a not-for-profit technical institute and trade association established in 1921 to serve the structural steel design community and construction industry in the United States. AISC’s mission is to make structural steel the material of choice by being the leader in structural-steel-related technical and market-building activities, including: specification and code development, research, education, technical assistance, quality certification, standardization, and market development. AISC has a long tradition of service to the steel construction industry providing timely and reliable information.”

Het AISC is verantwoordelijk voor een achttal codes overgenomen door het ANSI als nationale codes. Eén daarvan is de “Specification for Structural Steel Buildings” (ANSI/AISC 360-05).

Specification for Structural Steel

De Specifications for structural steel 2005 beschrijft, zoals de naam al doet vermoeden, de algemene specificaties voor constructie staal. De specificaties zijn opgesteld voor toetsingscriteria voor regelmatig gebruik, ze zijn dus niet geschikt voor ongebruikelijke problemen.

In de specificaties zijn twee methodes bij elkaar gevoegd, de ASD en LRFD. Voor dit document hadden deze formats beide een aparte specificatie notitie. Sinds de invoering van de Specifications for structural steel 2005 is dat dus verleden tijd en is er nog maar specificatie voor stalen constructies in de VS. De twee methodes bestaan echter nog steeds, maar volgen nu beide op hun eigen wijze de toetsingscriteria beschreven in de specificatie. Het hoe en wat van de methodes wordt hieronder besproken.

Allowable Stress Design (ASD)

De ASD is de originele methode die in de VS werd en in veel gevallen nog steeds wordt toegepast. Bij de ASD dient de nominale sterkte van een component gereduceerd te worden door te delen met veiligheidsfactor Ω . Deze Ω varieert afhankelijk van de toetsingsregel die gebruikt wordt. Aan de kant van de belastingen worden de mogelijke belasting combinaties zonder factoren bij elkaar opgeteld.

$$\frac{R_n}{\Omega} \geq \sum_{i=1}^m Q_{ni}$$

Waarin

- R_n = nominale sterkte van het constructie element
- Q_n = nominale belasting door één bepaalde last
- Ω = veiligheidsfactor
- i = type last
- m = aantal lasten

Wat hieraan opvalt, is dat er alleen maar een reductie is aan de kant van de sterkte. Dit heeft als direct gevolg dat een voorspelbare vaste last, met weinig spreiding, even zwaar wordt meegenomen als bijvoorbeeld een onvoorspelbare windbelasting, met veel spreiding. Om de veiligheid toch kunnen garanderen moet er hierdoor met grote veiligheidsfactoren gewerkt worden en zal daardoor in sommige gevallen grotere doorsneden nodig zijn volgens de ASD dan in werkelijkheid misschien het geval is. Hoewel deze methode door de enkele veiligheidsfactor zeer eenvoudig te hanteren is, is deze in veel gevallen niet economisch verantwoord.

Load and Resistance Factor Design (LRFD)

Zoals de naam al doet vermoeden gebruikt de LRFD wel veiligheidsfactoren van de belasting en de lasten. Omdat het AISC ook de problemen en de beperkingen van de ASD inzag heeft het in 1987 een nieuwe methode ontwikkeld, de LRFD.

$$\phi R_n \geq \sum_{i=1}^m \gamma_i Q_{ni}$$

Waarin

R_n = nominale sterkte van het constructie element

Q_n = nominale belasting door één bepaalde last

ϕ = veiligheidsfactor

m = aantal lasten

i = type last

γ_i = belastingsfactor

De mogelijke belastingscombinaties met belastingfactoren zijn.

1.4D

1.2D + 1.6L + 0.5(L_s/S/R)

1.2D + 1.6(L_s/S/R) + (0.5L + 0.8W)

1.2D + 1.3W + 0.5L + 0.5(L_r/S/R)

1.2D + 1.0E + 0.5L + 0.2S

0.9D +/- (1.3W/1.0E)

Waarin

D = vaste lasten (*dead load*)

L = variabele belasting (*live load*)

L_r = dak belasting (*roof load*)

W = windbelasting (*wind load*)

S = sneeuw belasting (*snow load*)

E = aardbeving belasting (*earthquake load*)

R = Nominale last door oorspronkelijk regenwater op ijs exclusief van vijvervorming

Hoewel deze methode een stuk ingewikkelder is lijkt hij wel een stuk nauwkeuriger, waardoor economischer en misschien ook wel veiliger ontworpen kan worden. Het blijkt dat in de praktijk de ASD nog veel meer gebruikt wordt omdat deze zo diep zit geworteld in de constructie cultuur in de VS. De AISC probeert ondertussen toch de onder wetenschappers veel meer geliefde LFDR aan populariteit te laten winnen. Hierdoor ook wordt er veel onderwezen in LFDR, wat in de praktijk een probleem kan zijn als daar van een jonge ingenieur verwacht wordt zijn berekeningen in ASD te doen.

COMPRESSIVE STRENGTH FOR FLEXURAL BUCKLING OF MEMBERS

Case	Description of Element	Width Thickness Ratio	Limiting Width-Thickness Ratios		Example
			λ_p (compact)	λ_r (noncompact)	
1	Flexure in flanges of rolled I-shaped sections and channels	b/t	$0.38\sqrt{E/F_y}$	$1.0\sqrt{E/F_y}$	
2	Flexure in flanges of doubly and singly symmetric I-shaped built-up sections	b/t	$0.38\sqrt{E/F_y}$	$0.95\sqrt{K_c E/F_y}^{[a],[b]}$	
3	Uniform compression in flanges of rolled I-shaped sections, plates projecting from rolled I-shaped sections; outstanding legs of pairs of angles in continuous contact and flanges of channels	b/t	NA	$0.56\sqrt{E/F_y}$	
4	Uniform compression in flanges of built-up I-shaped sections and plates or angle legs projecting from built-up I-shaped sections	b/t	NA	$0.64\sqrt{K_c E/F_y}^{[a]}$	
5	Uniform compression in legs of single angles, legs of double angles with separators, and all other unstiffened elements	b/t	NA	$0.45\sqrt{E/F_y}$	
6	Flexure in legs of single angles	b/t	$0.54\sqrt{E/F_y}$	$0.91\sqrt{E/F_y}$	

tabel 2.6 tabel 3, Tabel B4.1 (1/3) uit de AISC Specifications

Case	Description of Element	Width Thickness Ratio	Limiting Width-Thickness Ratios		Example
			λ_p (compact)	λ_r (noncompact)	
14	Uniform compression in all other stiffened elements	b/t	NA	$1.49\sqrt{E/F_y}$	
15	Circular hollow sections in uniform compression in flexure	D/t	NA	$0.11 E/F_y$	
		D/t	$0.07 E/F_y$	$0.31 E/F_y$	

^[a] $K_c = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)}$, but shall not be taken less than 0.35 nor greater than 0.76 for calculation purposes. (See Cases 2 and 4)

^[b] $F_L = 0.7 F_y$ for minor-axis bending, major axis bending of slender-web built-up I-shaped members, and major axis bending of compact and noncompact web built-up I-shaped members with $S_{xt}/S_{xc} \geq 0.7$; $F_L = F_y S_{xt}/S_{xc} \geq 0.5 F_y$ for major-axis bending of compact and noncompact web built-up I-shaped members with $S_{xt}/S_{xc} < 0.7$. (See Case 2)

tabel 2.8, Tabel B4.1 (1/3) uit de AISC Specifications

De sectie E3 van de specifications geeft de toetsingsformule voor druksterkte met het knikeffect in acht genomen, zonder torsiemomenten. Voor elementen met slanke delen in hun doorsnede kan deze regel nog iets worden uitgebreid, daarvoor wordt verwezen naar sectie E7. In sectie B4 wordt een tabel gegeven die het verschil aangeeft tussen “compact, noncompact, or slender-element sections”. Zie tabel 2.6, 2.7 en 2.8 voor deze tabel, als het niet aan de eis voor noncompact voldoet is het automatisch slendor. Voor het knik geval is alleen het verschil slendor en nonslendor lelements gemaakt. Verschil tussen compact en noncompact wordt hier niet gemaakt.

Case	Description of Element	Width Thickness Ratio	Limiting Width-Thickness Ratios		Example
			λ_p (compact)	λ_r (noncompact)	
7	Flexure in flanges of tees	b/t	$0.38\sqrt{E/F_y}$	$1.0\sqrt{E/F_y}$	
8	Uniform compression in stems of tees	d/t	NA	$0.75\sqrt{E/F_y}$	
9	Flexure in webs of doubly symmetric I-shaped sections and channels	h/t_w	$3.76\sqrt{E/F_y}$	$5.70\sqrt{E/F_y}$	
10	Uniform compression in webs of doubly symmetric I-shaped sections	h/t_w	NA	$1.49\sqrt{E/F_y}$	
11	Flexure in webs of singly-symmetric I-shaped sections	h_c/t_w	$\frac{h_c}{h_p} \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ $\left(0.54 \frac{M_p}{M_y} - 0.09\right)^2 \leq \lambda_r$	$5.70\sqrt{E/F_y}$	
12	Uniform compression in flanges of rectangular box and hollow structural sections of uniform thickness subject to bending or compression; flange cover plates and diaphragm plates between lines of fasteners or welds	b/t	$1.12\sqrt{E/F_y}$	$1.40\sqrt{E/F_y}$	
13	Flexure in webs of rectangular HSS	h/t	$2.42\sqrt{E/F_y}$	$5.70\sqrt{E/F_y}$	

Tabel 2.7, Tabel B4.1 (2/3) uit de AISC Specifications

Volgens sectie E3 moet de druk sterkte als volgt worden bepaald.

$$P_n = F_{cr} A_g$$

Waarin

P_n = nominale normaalsterkte van het constructie element

A_g = de gehele oppervlakte van een doorsnede

F_{cr} = de knikspanning, gegeven door,

$$F_{cr} = \left[0.658^{\frac{F_y}{F_e}} \right] F_y \quad \text{als } F_e \geq 0.44F_y$$

En

$$F_{cr} = 0.877F_e \quad \text{als } F_e < 0.44F_y$$

met

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r} \right)^2}$$

Waarin

E = de elasticiteit modulus

K = effectieve lengte factor

L = lengte van het element

r = de traagheidsstraal

F_y = de representatieve vloeispanning

K en L samen kunnen worden opgevat als de kniklengte van het element.

In sectie E7, die ook gebruikt kan worden als een element slanke delen bevat is toetsingsregel er als volgt.

$$P_n = F_{cr} A_g$$

Waarin

F_{cr} = de knikkraft, gegeven door,

$$F_{cr} = \left[0.658^{\frac{QF_y}{F_e}} \right] F_y \quad \text{als } F_e \geq 0.44QF_y$$

en

$$F_{cr} = 0.877F_e \quad \text{als } F_e < 0.44QF_y$$

met

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r} \right)^2}$$

En

Q = slankheidsfactor

Het verschil is dus dat een slankheidsfactor Q wordt toegevoegd aan de vloeispanning van het staal. Met als gevolg dat $F_y' = QF_y$.

Q kan bestaan uit zowel Q_s voor “unstiffend elements” en Q_a “stiffend elements”. Zie 2.6, 2.7 en 2.8 Elementen zijn in deze delen van een dwarsdoorsnede, alle slanke delen in de dwarsdoorsnede dienen vermenigvuldigd te worden. Totale Q is dus $Q_s Q_a$. Hieronder is een voorbeeld gegeven voor flensen, hoeken en platen voortkomend vanuit gerolde kolommen of andere druk elementen.

$$Q_s = 1.0 \quad \text{als } \frac{b}{t} \leq 0.56 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

$$Q_s = 1.415 - 0.74 \left(\frac{b}{t} \right) \sqrt{\frac{F_y}{E}} \quad \text{als } 0.56 \sqrt{\frac{E}{F_y}} < b/t < 1.03 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

$$Q_s = \frac{0.69E}{F_y \left(\frac{b}{t} \right)^2} \quad \text{als } b/t \leq 1.03 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

Per definitie is het zo dat een element niet uit slanke delen bestaat dat moet gelden $Q=1$. Het blijkt dan ook zo dat als sectie E7 blijkt dat $Q=1$ dit slanke delen zijn volgens sectie B4. De gevallen waarvoor Q beschreven zijn de unstiffend elements uit cases 3,4,5,8 en de stiffed elements 10,14,15 uit 2.6, 2.7 en 2.8. Voor elke case is een aparte toetsingsregel in sectie E7 gegeven.

Interessant is om op te merken dat er in geen van de gevallen naar de breedte hoogte verhouding wordt gekeken om de afweging slank of niet te maken. Er is dus met andere woorden voor gekozen om de normen zo op te stellen dat de hoogte breedte verhouding *geen* invloed kan hebben op de veiligheid van het systeem.

Veranderingen in de tijd

Zoals eerder al aangegeven waren er vroeger twee specificaties. Eén voor de ASD en één voor de LRFD. Dit betekend dat zowel voor de ASD en LRFD toetsingsregels veranderd zijn met de invoering van de nieuwe specificaties in 2005. Voor het knik probleem met de LRFD is er inhoudelijk niet iets veranderd. De toetsingsregel heeft echter wel een nieuw jasje gekregen. In de oude specificaties van de LRFD gelde de volgende toetsingsregel voor de druksterkte met in achtneming van het knikprobleem.

$$P_n = A_g F_y \left(0.658^{\lambda_c^2} \right) \quad \text{als } \lambda_c \leq 1.5$$

en

$$P_n = A_g F_y \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right) \quad \text{als } \lambda_c > 1.5$$

Met

$$\lambda_c = \frac{KL}{\pi r} \sqrt{\frac{F_y}{E}}$$

Als je nu λ_c uitzet tegen $\frac{P}{P_n}$ krijg je de volgende grafiek.

Grafiek

Het blijkt dat deze grafiek zeer veel lijkt op de knikcurves uit de eurocode 3, maar daarover verderop in het hoofdstuk meer. Als deze codes voor het de vergelijking gebruikt gaan worden moet nog wel bewezen worden dat het ook echt de zelfde code is in een ander jasje.

We beginnen met de vraag $F_e \geq 0.44F_y$ is dat hetzelfde als $\lambda_c \leq 1.5$?

$$\begin{aligned} & \lambda_c \leq 1.5 \\ \Rightarrow & \frac{KL}{\pi r} \sqrt{\frac{F_y}{E}} \leq 1.5 \\ \Rightarrow & \frac{K^2 L^2}{\pi^2 r^2} \frac{F_y}{E} \leq 1.5^2 \\ \Rightarrow & \frac{\pi^2 r^2}{K^2 L^2} \frac{E}{F_y} \geq \frac{1}{1.5^2} \\ \Rightarrow & \frac{\pi^2}{\left(\frac{KL}{r} \right)^2} \frac{E}{F_y} \geq \frac{1}{1.5^2} \\ \Rightarrow & \frac{F_e}{F_y} \geq \frac{1}{1.5^2} \\ \Rightarrow & F_e \geq \frac{F_y}{1.5^2} \approx 0.44F_y \end{aligned}$$

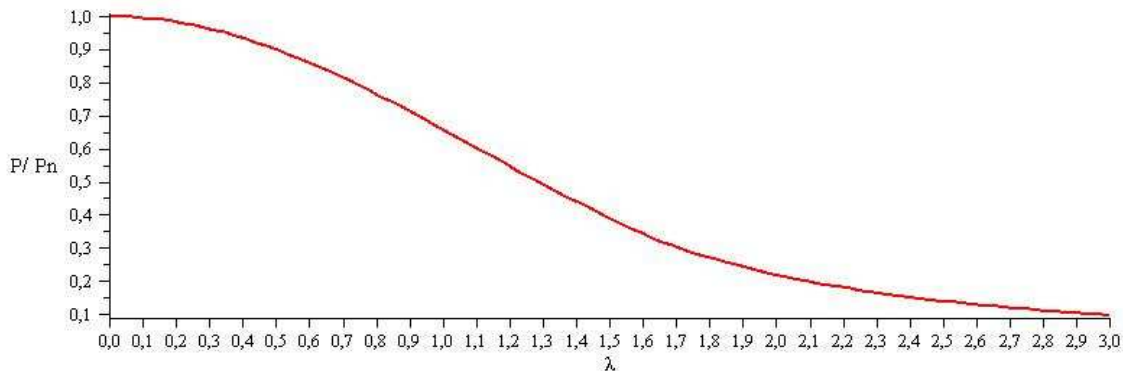
q.e.d.

Dan $F_{cr} = \left[0.658^{\frac{F_y}{F_e}} \right] F_y$ is dat gelijk aan $F_y \left(0.658^{\lambda_c^2} \right)$? Dus is $\frac{F_y}{F_e}$ gelijk aan λ_c^2 .

$$\frac{1}{\lambda_c^2} = \frac{\pi^2}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \frac{E}{F_y} = \frac{F_e}{F_y} \text{ q.e.d.}$$

Tot slot dan nog de vraag of $F_{cr} = 0.877 F_e$ gelijk is aan $P_n = A_g F_y \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right)$? Dus of

$\frac{F_y}{\lambda_c^2}$ hetzelfde is als F_e . Dit is precies de zelfde vraag dan of $\frac{F_y}{F_e}$ gelijk is aan λ_c^2 , dus ook dit is bewezen. Dit maakt dat de oude toetsings formule precies de zelfde is als de nieuwe en dat die prima te gebruiken is bij de vergelijking met de eurocodes.



figuur 2.2, het knikdiagram volgens the AISC specifications

2.3 Vergelijking

De AISC en de eurocode 3 zijn verschillende aspecten zeer verschillend en op andere blijken ze toch veel de especten bevatten. Hoewel het natuurlijk zeer interssant is om deze allemaal te bespreken beperk ik me, omwille van doelmatigheid, hier slechts tot de criteria betreffende het knikprobleem.

Om een goede vergelijking te maken hoe de twee codes zich tot elkaar verhouden. Het makkelijkst is het om hier gebruik te maken van de knikcurve van de oude lrfd specificaties en de vijf lrfd knikcurven. Deze hebben beide op de verticale as een reductiefactor voor de sterkte, beide hebben de zelfde functie alleen andere naam. Op de horizontale as is bij beide curven een λ weergegeven. De vraag is nu hoe deze zich tot elkaar verhouden. Uit onderstaand bewijs blijkt dat beide de waarde weerwegen.

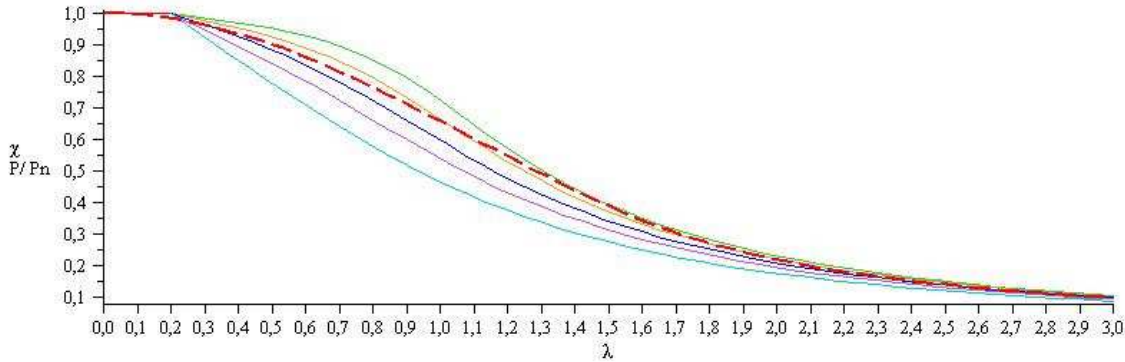
$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} \quad \text{met } N_{cr} = \pi \sqrt{\frac{EI_y}{L_{cr}^2}}$$

$$\Rightarrow \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{\pi^2 \frac{EI}{L_{cr}^2}}} = \frac{\sqrt{A f_y}}{\pi \frac{\sqrt{EI}}{L_{cr}}}$$

$$\Rightarrow \bar{\lambda} = \frac{\sqrt{A} \sqrt{f_y} L_{cr}}{\pi \sqrt{E} \sqrt{I}} = \frac{L_{cr}}{\pi} \sqrt{\frac{A}{I}} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad \text{met } \sqrt{\frac{I}{A}} = r \text{ en met } L_{cr} = KL$$

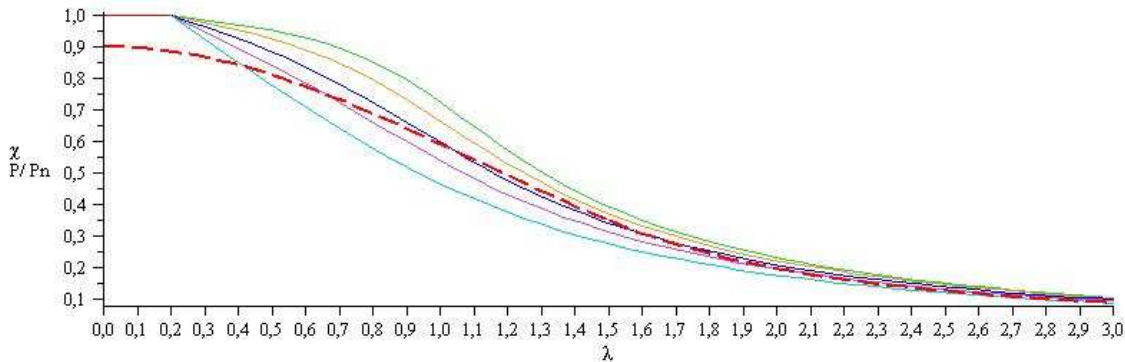
$$\Rightarrow \bar{\lambda} = \frac{KL}{\pi r} \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \lambda_c \quad \text{q.e.d.}$$

Het komt er dus op neer dat de assen van beide grafieken exact dezelfde zijn. Om een goed beeld te krijgen kunnen ze dus prima in dezelfde grafiek weergegeven worden.



figuur 2.3

Dit geeft echter nog wel een vertekend beeld omdat bij de specifications er nog een veiligheidsfactor wordt toegevoegd na gebruik van de toetsingsregel. In onderstaande grafiek is dit wel meegenomen.



figuur 2.4

In figuur 2.4 is te zien dat tot ongeveer lambda is 0.4 de specifications zelfs conservatiever zijn dan de d curve uit de eurocodes. Daarna loopt hij langzaam richting de b curve. Het grote verschil blijft natuurlijk dat bij specifications niet gekozen hoeft te worden voor een curve, je hebt er namelijk maar één. Wel moet deze nog extra reduceert worden als het element te slank is. Ook bij de eurocode is verschil op te merken, bij doorsnee klasse 4 moet immers de effectieve oppervlakte gebruikt worden. Een interessante vraag is nu hoe de eisen voor klasse 3 verhouden met de eisen waarvoor de factor Q een waarde kleiner dan 1.0 krijgt. Voor verschillende doorsnee-elementen is dit weergegeven in tabel 2.9.

Soort element van doorsnede (case)	Factor in specification	Factor omgezet in eurocode	Factor van doorsneeklasse 3
Uitstaandeflensen (3)	0.56 ²	16.3	14
Hoekstalen (5)	0.45 ²	13.1	15
Lijf I-profielen (10)	1.49 ²	43.5	42
Interne drukelementen (14)	1.40 ²	40.8	42
CHS (15)	0.11	93.6	90

tabel 2.9

Uit deze tabel blijkt dat het slender criterium van de AISC ongerveer gelijk is met de grens van doorsneeklasse 3, in ieder geval wat betreft op druk belaste elementen. Dit is natuurlijk mooi voor de vergelijking, het slankheidsaspect kan dus in principe buiten de vergelijking gehouden worden. Al zou het natuurlijk ook interessant zijn om de rekenwijze voor de effectieve oppervlakte te vergelijken met de factor Q , laat ik dat over aan andere.

Conclusie

Teruggaand naar de grafiek en het ontstaan van deze zijn er een paar duidelijke conclusies te trekken. Om te beginnen houdt de AISC specifications geen rekening met de hoogte/breedte verhouding en de dikte van de flens van het element. Omdat dit in de eurocode 3 wel gebeurd is het toch logisch te veronderstellen dat deze twee zaken weldegelijk effect hebben. Dat specifications grenzen stellen aan de slankheid lijkt hier niet voor te compenseren aangezien dit voor de zelfde slankheid bij de eurocode 3 ook gebeurd. Dit heeft als gevolg dat de specifications makkelijker in gebruik zijn, je hebt één processtap minder. Daarentegen zijn de criteria ook minder nauwkeurig. Dit leidt tot conservativisme met een kleine λ , de grafiek loopt tot λ is 0.4 immers onder alle eurocode 3 knikcurven. Misschien in sommige gevallen ook wel onveilig, de curve loopt namelijk ook boven sommige eurocodes over een significant gebied. Er valt wat voor te zeggen dat de AISC specifications hier aan de onveilige kan zijn.

Om dit wat inzichtelijker te maken wordt in de volgende paragraaf een aan doorsneden, met zelfde kracht en kniklengte, doorgerend met behulp van beide toetsingsregels. Hoofdstuk 4 geeft een totaal overzicht van conclusies en aanbevelingen.

2.4 Voorbeelden

In onderstaande tabel zijn de resultaten te vinden acht Europese profielen en acht Amerikaanse. Alle profielen zijn doorgerekend voor een reductiefactor voor de zwakke as, van een kniklengte van 5 meter, en voor de sterke as, met een kniklengte van 10 meter. Te zien is dat, zoals al voorspelt in de vorige paragraaf, dat de eurocode in de meeste gevallen een kleine reductiewaarde geeft. Alleen bij de c curve is de factor van de AISC met een

grotere lambda kleiner. De resultaten zijn dus conform de verwachtingen uit de vorige paragraaf.

knik over de zwakke as met een knik lengte van 5 meter							
	i	λ	h/b	t	curve	Factor eur	Factor US
HE900A	65	0,82	2,97	30	b	0,71	0,68
HE450A	72	0,73	1,47	21	b	0,77	0,72
HE240A	60	0,89	0,96	12	c	0,61	0,65
HE100A	25	2,12	0,91	5,5	c	0,18	0,18
IPE600	46	1,14	2,73	24	b	0,57	0,52
IPE360	39	1,41	2,11	12,7	b	0,38	0,41
IPE240	26	1,97	1,975	9,8	b	0,21	0,2
IPE100	12	4,28	1,78	5,7	b	0,05	0,04
W14x30	38	1,4	2,05	9	b	0,39	0,4
W14x176	102	0,52	0,975	33	c	0,8	0,83
W33x130	61	0,87	2,8	21	b	0,68	0,65
W33x221	91	0,59	2,9	32	b	0,84	0,78
WT6x13	38	1,4	0,94	10	c	0,35	0,4
WT6x126	42	1,18	0,6	57	c	0,44	0,45
WTx18x75	62	0,86	1,5	29	b	0,69	0,66
WT18x130	96	0,55	1,05	37	c	0,81	0,79

tabel 2.10

knik over de sterke as met een knik lengte van 10 meter							
	i	λ	h/b	t	curve	Factor eur	Factor US
HE900A	363	0,29	2,97	30	a	0,98	0,87
HE450A	189	0,56	1,47	21	a	0,9	0,78
HE240A	101	1,05	0,96	12	b	0,56	0,56
HE100A	40,6	2,62	0,91	5,5	b	0,13	0,11
IPE600	243	0,4	2,73	24	a	0,94	0,83
IPE360	150	0,7	2,11	12,7	a	0,84	0,728
IPE240	99,7	1,07	1,975	9,8	a	0,61	0,59
IPE100	40,7	2,61	1,78	5,7	a	0,13	0,12
W14x30	146	0,73	2,05	9	b	0,83	0,72
W14x176	163	0,65	0,975	33	c	0,81	0,75
W33x130	335	0,32	2,8	21	b	0,97	0,86
W33x221	358	0,3	2,9	32	b	0,98	0,87
WT6x13	44	2,42	0,94	10	c	0,15	0,14
WT6x126	85	1,25	0,6	57	c	0,45	0,47
WTx18x75	142	0,75	1,5	29	b	0,82	0,71
WT18x130	134	0,8	1,05	37	c	0,72	0,69

tabel 2.11

3. De Raamwerkprogramma's

3.1 Matrixframe

Matrix Software

Het softwarehuis verantwoordelijk voor MatrixFrame is MatrixSoftware. Matrix Software is sinds 1983 een zelfstandig Nederlands bedrijf dat zich gespecialiseerd heeft in bouwtechnische automatisering. Matrix Software ontwikkelt software voor automatisering van primaire bedrijfsprocessen naar aanleiding van marktbehoefte en wensen van opdrachtgevers.

De bedrijfsfocus van Matrix Software ligt op drie segmenten binnen de bouwtechnische automatisering. Ingenieurs, staalbouw en kozijnenbouw. Er zijn twee werkmaatschappijen opgericht Martix CAE voor de staal en ingenieurs energie en Matrix SH voor de kozijnenbouw. Eén van de programma's van Matrix CAE is MartixFrame.

MartixFrame

Het key selling point waarmee Matrix Software MatrixFrame verkoopt is dat het geschikt is voor het berekenen van doorgaande liggers, 2D en 3D raamwerken, balkroosters en vlakke plaatvloeren. Al deze constructievormen maken gebruik van de zelfde basis, waar bijvoorbeeld ook de normcontroles achter zitten, en hebben ook min of meer de zelfde interface. Dit alles maakt MatrixFrame volgens Matrix CAE easy to learn-easy to use.

MartixFrame werkt nauw samen met verschillende brancheverenigingen. Het programma lijkt in eerste instantie bedoeld als een gebruiksvoorwerp voor de professionele constructeur. Hoewel dit niet betekend dat het programma niet goed te gebruiken is door onderzoekers, heeft dit wel enkele gevolgen voor het gebruik van het programma.

Het gebruik van MatrixFrame

Het doorrekenen van een constructie in MatrixFrame gebeurt in twee, duidelijk gescheiden, stappen. Eerst wordt de ontworpen constructie in zijn geheel ingevoerd in MatrixFrame. Van de constructie zelf zoals opleggingen, verbindingen en doorsnede. Maar ook van de belastingen zoals grootte van de belasting, belastinggevallen en belastingsfactoren. Als dit alles correct is gebeurd kan MartixFrame voor de constructie een lineair of niet-lineair elastische berekening uitvoeren. Mocht hieruit komen dat de er aan het ingevoerde model zaken veranderd dienen te worden. Moet het model worden aangepast, waarna de gehele berekening overnieuw zal worden uitgevoerd. Als mogelijke derde stap zou je nog de toetsing van de constructie op toetsingscriteria kunnen doen.

Toetsing aan normen

De toetsing in MatrixFrame gebeurt aan de hand van de NEN en waar mogelijk de eurocodes. De toetsen worden uitgevoerd aan de hand van de berekende doorsnedenkrachten. Hoewel de constructeur bovenal verantwoordelijk blijft voor zijn ontworpen constructie mag een zekere waarde ontleen aan de toetsing van MatrixFrame.

Tweede-orde effecten

Voor het berekenen van de tweede-orde verplaatsing maakt matrixframe gebruik van de Newton-Raphson methode. Dit is een van oorsprong puur numeriek wiskundige methode om een nulpunt van een functie te bepalen. Dr. Ir. Vuik (TUDelft) beschrijft deze methode op zijn website als volgt:

Gegeven de functie f bepaal het nulpunt p zodanig dat $f(p) = 0$. Stel p_0 is een benadering van het nulpunt p . Maak nu de raaklijn $h(x)$ aan f door het punt $(p_0, f(p_0))$. De formule van h is:

$$h(x) = f(p_0) + \frac{df}{dx}(p_0)(x - p_0)$$

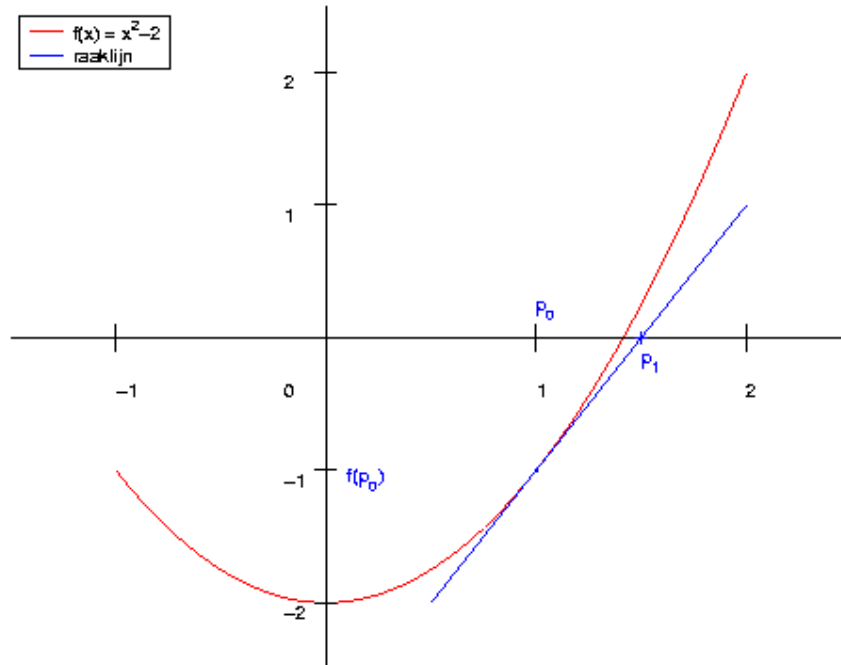
Om een nieuwe (betere) benadering te vinden van p bepalen we p_1 , die het nulpunt is van h , dus $h(p_1) = 0$. Invullen geeft:

$$0 = f(p_0) + \frac{df}{dx}(p_0)(p_1 - p_0)$$

Als we nu p_1 naar links brengen en alle andere termen naar rechts, dan krijgen we (onder de voorwaarde dat $[df/dx](p_0)$ is ongelijk aan 0):

$$p_1 = p_0 - \frac{f(p_0)}{\frac{df}{dx}(p_0)}$$

Zo kunnen we doorgaan om p_2 , p_3 , ... te vinden. De procedure staat uitgelegd in het onderstaande plaatje.



figuur 3.1

Bij het berekenen van de tweede-orde verplaatsingen wordt deze methode toegepast op de knoopp krachten f als functie van de verplaatsingen x , die dan ook in de constructie mechanische wetenschap bekend staat als de Newton-Raphson methode. In deze toepassing is men niet zo zeer opzoek naar het nulpunt maar in het punt van de opgelegde kracht met het equilibrium van last en de inwendige krachten als funtie van de verplaatsing, vanaf nu het last-verplaatsingdiagram genoemd. Als de grafiek wordt verschoven over een grote van de opgelegde last komt het uiteindelijk neer op een klassieke wiskundige Newton-Raphson oplossing. De afgeleide van deze last-verplaatsingsdiagram wordt gedefinieerd als de tangentstijfheid dit is een matrix $[K_T]$ die in verschillende componenten te schieden:

$$[K_T] = [K_0] + [K_L] + [K_\sigma]$$

Waarin

$[K_T]$ = De tangentstijfheidsmatrix

$[K_0]$ = Nulde orde stijfheid, bij een enkele kolom wordt deze gedefinieerd

$$\text{als } K_0 = \frac{EA}{L_0} \left(\frac{h}{L_0} \right)^2$$

$[K_L]$ = de verplaatsingstijfheid, bij een enkele kolom wordt deze

$$\text{gedefinieerd als } K_L = \frac{EA}{L_0} \left[2 \frac{u}{h} + \left(\frac{u}{h} \right)^2 \right] \left(\frac{h}{L_0} \right)^2$$

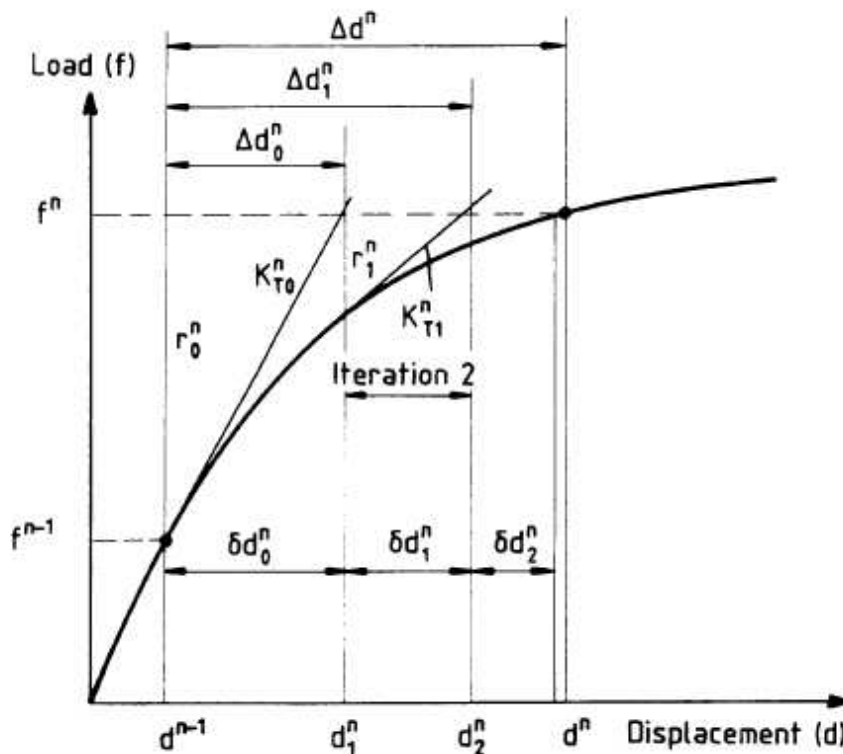
$[K_\sigma]$ = De spanningsstijfheid, bij een enkele kolom wordt deze gedefinieerd als

$$K_\sigma = \frac{N}{L_0}$$

In detail worden in de Newton-Raphson procedure de volgende stappen gemaakt:

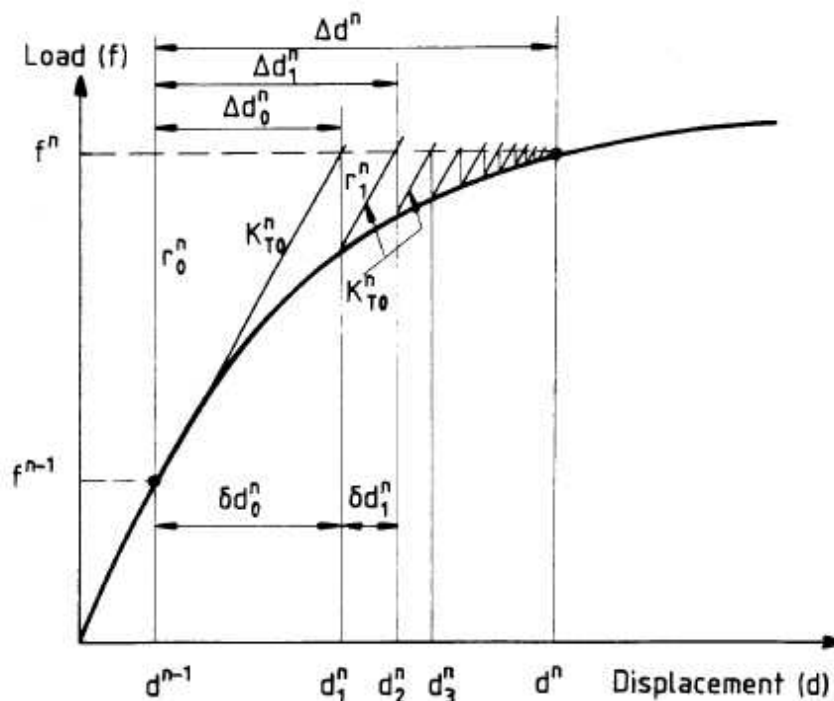
- In de beginsituatie is de opgelegde kracht in evenwicht met de tegengestelde kracht (P_0) die voortkomt uit het equilibrium van de stijfheid $[K_T]$ en de verplaatsing (d_0).
- Er wordt een nieuwe opgelegde kracht toegevoegd aan de al opgelegde kracht. Met als gevolg dat de nieuwe totale kracht (F^N) groter wordt dan de tegenwerkende kracht van het element. Er is dus geen evenwicht.
- Verschil tussen de nieuwe totale kracht en de tegenwerkende kracht is r_0^n
- De raaklijn vanuit P_0 , met als gradiënt de waarde van de $[K_T]$, snijdt de waarde van f_n in een punt. De verplaatsing in dat punt is de verplaatsing na de eerste iteratie d_1^n . Bij deze verplaatsing hoort weer een andere stijfheid en andere tegengestelde kracht. Deze zal leiden tot een nieuw verschil tussen opgelegde en tegenwerkende kracht (r_1^n).
- Daarna zal er met telkens een nieuwe verplaatsing en dus ook andere stijfheid door worden geïtereerd tot r_n^n kleiner is dan een vooraf gestelde waarde. De verplaatsing voor de opgelegde kracht is dan bepaald.

In een grafiek ziet dit als volgt uit.



figuur 3.2, powerpoint van Dep. of Computational Mechanics, AAU Esbjerg, Denmark

Doordat het bepalen van de stijfheid in elke iteratiestap nog al wat werk inhoud kiest men er vaak voor bij alle iteratie stappen de stijfheid van de originele verplaatsing aan te houden. Dit betekent meer iteratiestappen, maar dat is vaak toch gunstiger dan de gehele stijfheid meerdere malen te bepalen. Deze methode wordt wel de gemodificeerde Newton-Raphson methode genoemd. In een grafiek ziet dit als volgt uit.



figuur 3.3, powerpoint van Dep. of Computational Mechanics, AAU Esbjerg, Denmark

Omdat de bijvoorbeeld staal niet alleen afnemend stijver, maar onder een grote verplaatsing ook in stijfheid af kan nemen, kan het ineens opbrengen van de opgelegde kracht voor problemen zorgen. Een bekende oplossing hiervoor is dat de totale opgelegde kracht in meerdere stukjes last, incrementeel wordt aangebracht.

In MatrixFrame is er voor gekozen om de belasting in één stap op de constructie te zetten in plaats van een stapsgewijze verhoging van de belasting.

Knik belasting

In het voorgaande is het berekenen van de tweede orde verplaatsing besproken. Als de belasting steeds wordt verhoogd zullen de tweede orde verplaatsingen bijzonder groot worden. Dit wordt knikken genoemd. Als de eerste orde verplaatsingen klein blijven is het ook mogelijk om de knikkraft te bepalen als een eigenwaarde probleem. Voor deze aanpak is het niet nodig om de Newton-

Raphson methode te gebruiken en kan als op de volgende wijze uitgedrukt worden:

$$[K_o] + \lambda [K_\sigma \{N\}] \{\Delta d\} = 0$$

In deze oplossing is de initiële verplaatsing niet meegenomen. Als deze wel wordt meegenomen zal de knikkracht altijd lager zijn.

3.2 Dr. Frame

Dr. Software

Dr. Software is het bedrijf dat achter het raamwerk programma Dr. Frame zit. In juni 1997 debistuerden zij hun eerste software Visual Mechanics. Het bedrijf is voort gevloeid uit het onderzoeks- en onderwijsprogramma van Professor Gregory R. Millar voor zijn leerstoel aan universiteit van Washington. Prof. Millar is nu nog steeds Lead Technology Advisor.

De missie van Dr. Software is om ingenieurs programma's te ontwikkelen die studenten en professionele ontwerpers inzicht geven in het gedrag van constructies. De bedrijfsfocus ligt niet, zo ze het zelf zeggen, op boekhoudersdetails die nodig zijn voor het verkrijgen voor de perfecte numerieke oplossing.

Op dit moment verkoopt Dr. Frame drie gereedschappen: Dr. Beam Pro, Dr. Frame3D en Dr. Frame.

Dr. Frame

Dr. Frame is een 2D raamwerk programma waar op een interactieve wijze raamwerken zijn te bouwen en testen met directe numerieke en visuele feedback, aldus de site van Dr. Software.

Gebruik van Dr. Frame

Het bijzondere is dat Dr. Frame het resultaat van verplaatsing, capping, inwendige krachten direct aan de gebruiker laat zien. Zou er een constructie staat die niet onstabiel is, geeft Dr. Frame dan wel naast of onder de constructie dan wel in de constructie, afhankelijk van het product. Er een kracht op of bij wordt geplaatst, vergroot of verplaatst, is dat onmiddellijk te zien. Omdat Dr. Frame continu doorvoert maakt het uit in welke volgorde verschillende krachten geplaatst worden. Dit komt in veel gevallen dicht bij de werkelijkheid, maar in sommige meer theoretische of in toetsinggevallen weleens lastig zijn. Het plaatsen van verschillende lasten tegelijk kan gewoon niet. Dr. Frame kan door zijn werkwijze wel goed inzicht geven in het gedrag van de constructie. Het

programma kan echter niet zomaar zeer veel iteraties maken, hierdoor moet het de tweede-orde effecten anders berekenen dan veel andere programma's doen.

Toetsing aan normen

Dr. Frame geeft de mogelijkheid om de ingevoerde constructie met belasting te toetsen volgens de AISC specifications. In de handleiding geeft echter wel expliciet aan dat hoewel dit een goede indicatie geeft er nog wel additionele toetsing plaats moet vinden nadat het door de toetsing van Dr. Frame is gegaan. Waarschijnlijk is dit gedaan om juridische aansprakelijkheid te voorkomen, maar het komt toch ook duidelijk naar voren dat Dr. Frame hier niet in eerste instantie voor gemaakt is.

Tweede-orde effect

Voor het in rekening brengen van het tweede-erde effect in op druk belastte elementen rekent Dr. Frame eerst het lineair krachtenevenwicht met de daarbij behoorde normaalkracht uit. Hierna wordt de constructie nogmaals doorgerekend door gebruik te maken van de volgende differentiaalvergelijking,

$$EIv''''(x) + Pv''(x) = w_0 + w_1x$$

Met randvoorwaarde,

$$v(0) = v_i; v'(0) = \theta_i$$

$$v(L) = v_j; v'(L) = \theta_j$$

Als de tweede-orde effecten nog buiten beschouwing worden gehouden, dus met normaalkracht is nul, is de vergelijking uit te schrijven als de volgende matrix,

$$\frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & -6L & -12 & -6L \\ -6L & 4L^2 & 6L & 2L^2 \\ -12 & 6L & 12 & 6L \\ -6L & 2L^2 & 6L & 4L^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ \phi_1 \\ v_2 \\ \phi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ T_1 \\ F_2 \\ T_2 \end{bmatrix}$$

Om de tweede-orde effecten mee te nemen wordt de vergelijking uitgewerkt tot de volgende matrix,

$$\frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 2(\beta + \gamma) - \varepsilon^2 & -(\beta + \gamma)L & -2(\beta + \gamma) + \varepsilon^2 & -(\beta + \gamma)L \\ -(\beta + \gamma)L & \gamma L^2 & (\beta + \gamma)L & \beta L^2 \\ -2(\beta + \gamma) + \varepsilon^2 & (\beta + \gamma)L & 2(\beta + \gamma) - \varepsilon^2 & (\beta + \gamma)L \\ -(\beta + \gamma)L & \beta L^2 & (\beta + \gamma)L & \gamma L^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ \phi_1 \\ v_2 \\ \phi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ T_1 \\ F_2 \\ T_2 \end{bmatrix}$$

Waarin,

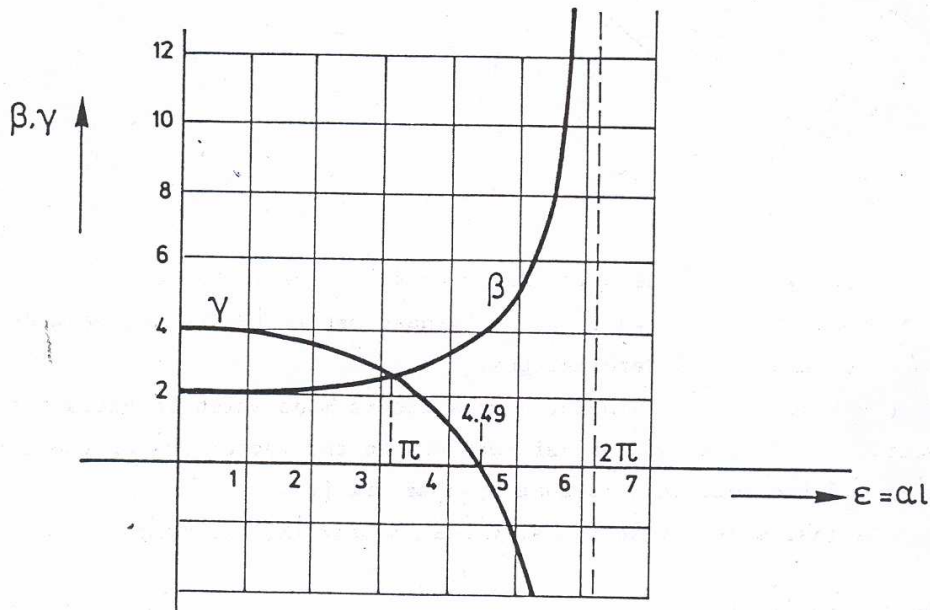
$$\varepsilon = L \sqrt{\frac{P}{EI}}$$

$$n = 2(1 - \cos \varepsilon) - \varepsilon \sin \varepsilon$$

$$\beta = \frac{(\varepsilon^2 - \varepsilon \sin \varepsilon)}{n}$$

$$\gamma = \frac{(\varepsilon \sin \varepsilon - \varepsilon^2 \cos \varepsilon)}{n}$$

Op te merken valt dat β en γ nu afhankelijk zijn van ε en dus van normaalkracht P . β en γ kunnen worden uitgezet tegenover ε (fig 3.3), te zien is dat bij $\varepsilon = 0$, β en γ respectievelijk een waarde van 2 en 4 krijgen. Als deze waarde in tweede-orde matrix ingevuld wordt ontstaat de eerste-orde matrix. Dit klopt natuurlijk omdat als ε nul is, P ook nul moet zijn.



figuur 3.3

Nadat Dr. Frame de tweede-orde berekening heeft uitgevoerd is er meestal een herverdeling van spanningen en het constructiedeel. Hierdoor zouden er misschien één of meerdere iteraties volgen om een nog nauwkeurigere oplossing te verkrijgen. Deze iteraties voert Dr. Frame niet zelf uit, de gebruiker zal op de i knop moet toetsen om een iteratie plaats te laten vinden.

De oplossing die Dr. Frame op deze wijze verkrijgt is, hoewel de stijfheid afhankelijk is van de normaalkracht, nog altijd lineair elastisch. Omdat er nu wel herverdeling van krachten hebben plaats gevonden kan het in sommige gevallen nuttig zijn dat Dr. Frame de berekening nog een keer uitvoert. Met een druk op de i -knop maakt Dr. Frame een iteratie.

Lastafhankelijke EI

Om een realistischer resultaat te krijgen geeft Dr. Frame de mogelijkheid om met een lastafhankelijke EI te werken. Dit gebeurt aan de hand van een methode die bedacht is door Liew in 1992 [zie blz 275 van Stability Design of Semi-Rigid Frames] Die methode maakt gebruik van de AISC Specificaties en gaat als volgt.

Er wordt gebruikt gemaakt van de “oude” specificaties,

dus

$$P_n = P_y \left(0.658^{\lambda_c^2} \right) \quad \text{als } \lambda_c \leq 1.5$$

en

$$P_n = P_y \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right) \quad \text{als } \lambda_c > 1.5$$

Waarin

$$P_y = A_g F_y$$

De tangent modulus E_t kan bepaald worden door gebruik te maken van de reductie in sterkte gegeven in de bestaande ontwerpregel. Dit gebeurt door de ratio te nemen van de tangent en de elastische modulus, dit als volgt geschreven worden,

$$\frac{E_t}{E} \approx \frac{(P_n)_{inelastisch}}{(P_n)_{elastisch}} = \frac{0.658^{\lambda_c^2}}{0.877 / \lambda_c^2} \leq 1.0$$

Voor een drukelement dat volgens de inelastische methode getoetst dient te worden, dus $\lambda_c \leq 1.5$ is λ_c als volgt uit te drukken.

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{\ln(P_n / P_y)}{\ln(0.658)}}$$

Want

$$P_n = P_y \left(0.658^{\lambda_c^2} \right)$$

$$\frac{P_n}{P_y} = 0.658^{\lambda_c^2}$$

$$\lambda_c^2 = \log_{0.658} \left(\frac{P_n}{P_y} \right)$$

$$\text{want } a^y = x \Leftrightarrow y = \log_a x$$

$$\lambda_c^2 = \frac{\ln(P_n / P_y)}{\ln(0.658)}$$

$$\text{want } \log_a x = \frac{\ln x}{\ln a}$$

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{\ln(P_n / P_y)}{\ln(0.658)}} \quad \text{q.e.d.}$$

Als deze λ_c ingevuld wordt in de tangent/elastische ratio ontstaat de volgende uitdrukking.

$$\frac{E_t}{E} \approx \frac{(P_n)_{inelastisch}}{(P_n)_{elastisch}} = \frac{0.658^{\lambda_c^2}}{0.877 / \lambda_c^2} = \frac{P_n / P_y}{0.877 \cdot \ln(0.658)} = \frac{1}{0.877 \cdot \ln(0.658)} \frac{P_n}{P_y} \ln\left(\frac{P_n}{P_y}\right)$$

Het heeft geen zin om deze zelfde methode te volgen voor het elastische gebied, want dan zou er alleen maar een grotere E ontstaan.

De uiteindelijke uitdrukking wordt volgens Liew,

$$\frac{E_t}{E} = \begin{cases} 1.0, & \text{voor } P_n \leq 0.39P_y \\ -2.7243P_n / P_y \ln(P_n / P_y), & \text{voor } P_n > 0.39P_y \end{cases}$$

Doordat deze methode gebruikt maakt van ontwerpregels waar imperfecties van de constructie elementen al in verwerkt zijn, zou je dus kunnen zeggen dat met het gebruik van deze methode in directe zin die zelfde imperfecties in rekening worden gebracht.

Volgens de handleiding van Dr. Frame gebruikt het programma de bovenstaande omzetting van de AISC ontwerpregel. Echter, in de handleiding staat hiervoor een andere uitkomst.

$$EI_{eff} = \phi_c EI \times \begin{cases} 0.877, & \text{voor } P_n \leq 0.39P_y \\ (1/\ln(0.658)) P_n / P_y \ln(P_n / P_y), & \text{voor } P_n > 0.39P_y \end{cases}$$

Blijkbaar is het voorgaande resultaat met een factor 0.877 vermenigvuldigd. Het is niet duidelijk waar dit vandaan komt. Dat men EI , en niet zoals Liew alleen E gebruiken, maakt niet uit voor de afleiding. Ook de veiligheidsfactor ϕ kan deze reductie niet verklaren. Met wat verder doordenken is de 0.877 misschien toch te verklaren. Ten eerste moet bedacht worden de theoretische elastische kniklast gezegd kan worden $P_e = 1/\lambda$. In de AISC specifications staat echter $0.877/\lambda$. Een reductie dus van 0.877 die niet te verklaren is door het verschil tussen inelastisch en elastisch rekenen. Ik neem dus aan dat deze 0.877 in gedachte van Dr. Software door imperfecties en misschien initiële spanningen komt. Waarschijnlijk komt hierdoor de factor van 0.877 nog op zowel elastische als in elastische uitkomsten.

Stabiliteitsratio meter

Als de constructie kinetisch onbepaald en dus onbepaald is, is de constructie bij voorbaat onstabiel. Dr. Frame rekent de constructie dan ook niet door en geeft de

melding “unstable”. Een constructie kan ook door tweede-orde effecten onstabiel worden. Dit effect wordt door Dr. Frame meegenomen. Dit gebeurt door de verhouding te nemen van de non-lineaire stijfheid en de lineaire stijfheid. Als er gekozen wordt voor de non-lineaire berekening wordt deze verhouding onderin beeld weergegeven als de stabiliteitsratio meter. Als deze vol en dus de ratio naar nul is gegaan verkleurd deze en geeft Dr. Frame ook hier de melding “unstable”. Door deze methode is zeer gemakkelijk te zien hoe een constructie tegen zijn maximum aanzit. In de handleiding adviseert Dr. Frame ook geen constructie te gebruiken die te dicht tegen de niet lineaire onstabiliteit aanliggen. Kleine onvolkomenheden kunnen er in zo een geval voor zorgen dat de constructie in werkelijkheid wel zou bezwijken.

3.3 Vergelijking van de Raamwerkprogramma's

Dr. Frame en MatrixFrame blijken duidelijk andere programma's te zijn. Dit misschien deels doordat beide programma's op andere contingenten zijn ontworpen. Belangrijkste factor is toch de programma met een andere insteek, een andere filosofie, zijn ontworpen. Dit komt voornamelijk naar voren in het moment wanneer beide programma's hun resultaten laten zien aan de gebruiker.

Dr. Frame is meer een digitaal laboratorium waar de gebruiker direct kan zien wat een verandering in de constructie voor effect hebben op de interne krachten en verplaatsingen van de constructie. Bij MatrixFrame gebeurt juist niet. Bij dat programma moet de gebruiker eerst de hele constructie goed gemoduleerd hebben, waarna de constructie doorgerekend wordt en de gebruiker de resultaten kan zien. Als hij iets aan de constructie heeft veranderd. Moet MatrixFrame de hele berekening nogmaals uitvoeren.

Gevolg hiervan is dat in MatrixFrame gewerkt kan worden voor vele iteraties en dat het naar keuze van de gebruiker vrij ingewikkelde, tijvergende bewerkingen uit kan voeren. Dit is bij Dr. Frame niet mogelijk omdat dan deze berekeningen bij stap in het invoerproces gedaan dienen te worden, dat zou veel te lang duren. Het is dus waarschijnlijker dat de resultaten van MatrixFrame dichterbij de theoretische werkelijkheid liggen dan die van Dr. Frame. Met dit argument zou je de stelling kunnen verdedigen dat MatrixFrame beter is dan Dr. Frame.

Een ander gevolg van het moment van de verwerking van de ingevoerde gegevens spreekt daar in tegen weer in het voordeel van Dr. Frame. Doordat de gebruiker tijdens het opbouwen van zijn constructie direct kan zien wat de gevolgen zijn kan hij daar meteen op anticiperen. Hij kan bijvoorbeeld zien welke elementen op druk belast worden en welke op trek. Als de gebruiker een onbruikbare constructie heeft ontworpen ziet hij dit waarschijnlijk eerder dan in MatrixFrame. De gebruiker kan de constructie ook veel makkelijker aanpassen, hij ziet immers meteen welke aanpassen positief zijn.

Tweede-orde effecten.

Een situatie waar de verschillen, en daarmee de voor- en nadelen van beide programma's, duidelijk naar voren komen is als beide de gebruiker rekening wil houden met tweede-orde effecten. In bovenstaande paragrafen is te lezen hoe beide programma's rekening houden met deze effecten. Hierin is te lezen dat MatrixFrame een Newton-Raphson methode gebruikt. Dit is een methode die bij genoeg iteraties zeer nauwkeurig kan zijn. Dr. Frame gebruikt in eerste instantie een simpele één stap berekening welke wel door de gebruiker nog verder genitreerd kan worden. Omdat met deze methode nog geen rekening wordt gehouden met het niet lineaire gedrag kan de stijfheid nog reduceert worden aan de hand van Amerikaanse code. In heeft als voordeel dat imperfecties in constructie materiaal in de code en dus ook in deze methode zitten. In een meter kan de gebruiker direct zien hoe instabiel zijn constructie is, als hij te instabiel is wordt deze niet meer uitgerekend. In principe gebruikt MatrixFrame dus een nauwkeurige methode, maar in Dr. Frame kan de gebruiker meteen de verplaatsing en de mate van instabiliteit zien. Dit is geheel naar verwachting als je naar de filosofieën van beide programma's kijkt.

Imperfecties

Door de methode die Dr. Frame gebruikt houdt dit programma meteen rekening imperfecties. MatrixFrame doet dit niet in de standaard niet lineaire berekening en heeft er ook geen extra methode voor. Dit is geen ramp voor de toetsing van matrixframe, dit gebeurt immers volgens de eurcode 3 waar imperfecties in zijn verwerkt. Wel dient de gebruiker de kniklengte zelf te bepalen en in te vullen. De verplaatsing in MatrixFrame zal dus altijd een kleine waarde aangeven, waarschijnlijk is dit met een vrij stabiel constructiegeval geen groot verschil. Daarentegen zou het wel zo mooi zijn als MatrixFrame dit toch zou doen.

De vraag of de methode die Dr. Frame gebruikt ook toegepast worden in Matrix is nu een logische. Precies zoals die in Dr. Frame gebruikt wordt kan dit moeilijk. In de reductie van de stijfheid zit namelijk niet alleen de imperfecties maar belijker her verschil tussen elastische en niet elastische rekenmethode. Hierom zijn er in de eurocodes ook meerdere curven, verschillende doorsnede zijn gevoeliger voor tweede-orde effecten dan andere. Dit wordt in MartixFrame juist met de Newton-Raphson methode gedaan. In AISC specifications lijkt er een factor van 0.877 gegeven te zijn aan imperfecties en dergelijke. Een logische en zeer verdedigbare methode is dan ook, om imperfecties toch in MatrixFrame mee te nemen, is een reductie van de stijfheid met 0.877.

Het enige is dan wel dat een Amerikaanse wordt gebruikt als uitgangspunt. Dit ook doen met de Eurode 3 is lastig aangezien daar minder duidelijk een scheiding wordt gemaakt in een elastisch deel en een inelastisch deel. Als de ontwerpers toch de Amerikaanse code willen gebruiken stuiten zij op belangrijk probleem. Hoewel met een stijfheidreductie de verplaatsingen misschien beter in beeld worden gebracht, houdt dit in dat de normale toetsingsregels niet meer voldoen, hier worden de imperfecties namelijk nogmaals meekomen. Aangezien

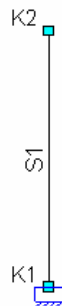
MatrixFrame er ontworpen op lijkt te zijn om goed te toetsen lijkt het onwaarschijnlijk dat dit zomaar in MatrixFrame wordt doorgevoerd. Wel zou, als de gebruiker dat wilt, één berekening voor de toetsing en één voor de verplaatsing. Dit wordt misschien wel wat omslachtig.

De mogelijkheid die over blijft is de imperfectiefactor uit de Eurocode 3 halen. Omdat deze waarschijnlijk door veel testen is gevormd is het zeer onwaarschijnlijk dat een bedrijf als Matrix CAE is hieraan zal wagen. Als gebruiker kan je natuurlijk wel de Amerikaanse factor gebruiken, wel moet dan rekening gehouden worden dat er ook nog een ander toetsmodel gemaakt dient te worden.

Wat tenslotte nog gezegd kan worden is het volgende. Waarom is er geen programma, zover mij bekend, die de voordelen van Dr. Frame en MatrixFrame samen brengt? Naar mijn mening zou het ideale raamwerk programma Dr. Frame voor de definitieve berekening zijn en MatrixFrame daarna. Waarom of of als het ook en en kan zijn? Het antwoord op deze vraag moet ik u helaas schuldig blijven. In de volgende paragraaf zijn ter illustratie een paar berekeningen gedaan met beide programma's.

3.4 Voorbeelden

Onderstaand staan in een paar tabellen de resultaten weergegeven van berekeningen gedaan met MatrixFrame en Dr. Frame. Ze zijn gedaan de van volgend mechanica schema. De lengte van het element is vijf meter.



figuur 3.4

Het creëren van de zelfde profielen in de twee programma's was niet heel eenvoudig. Uiteindelijk heb ik geprobeerd in MatrixFrame een I-profiel te maken met gegevens die bij Dr. Frame werden gegeven voor de standaard profielen. Uiteindelijk heb ik twee profielen gebruikt. Volgens de uitkomsten geeft Dr. Frame een veel grotere uitwijking dan met MatrixFrame, voor mij betreft wel heel groot. Ik moet dan ook wel vraagtekens zetten bij gelijkheid van de verschillende profielen. Wat wel duidelijk uit de voorbeelden komt is de uitwijking bij Dr. Frame met hele grote stappen gaat als er dicht bij de kniklast gekomen wordt. Bij MatrixFrame is meer constantere groei te zien.

Profiel 230x610x13x22 met horizontale belasting								
horizontale last (kN)	2	20	2	20	2	20	2	20
verticale last (kN)	300	300	600	600	900	900	1200	1200
Dr. Frame								
horizontale verplaatsing (mm)	0,41	4,14	0,46	4,6	0,53	5,3	0,54	5,4
verticale verplaatsing (mm)	0,42	0,42	0,84	0,84	1,3	1,3	1,7	1,7
MatrixFrame								
horizontale verplaatsing (mm)	0,37	3,7	0,38	3,8	0,38	3,8	0,39	3,9
verticale verplaatsing (mm)	0,4	0,4	0,8	0,8	1,2	1,2	1,6	1,6

tabel 3.1

Profiel 380x380x16.6x27 met horizontale belasting								
horizontale last (kN)	2	20	2	20	2	20	2	20
verticale last (kN)	300	300	600	600	900	900	1200	1200
Dr. Frame								
horizontale verplaatsing (mm)	2,42	24,3	3,07	30,7	3,82	38,2	4,4	44
verticale verplaatsing (mm)	0,46	0,46	0,92	0,92	1,37	13,7	1,83	1,83
MatrixFrame								
horizontale verplaatsing (mm)	0,59	5,9	0,6	6	0,61	6,1	0,63	6,3
verticale verplaatsing (mm)	0,3	0,3	0,6	0,6	0,8	0,8	1,1	1,1
horizontale last (kN)	2	20	2	20	2	20	2	20
verticale last (kN)	1500	1500	1800	1800	2100	2100	2400	2400
Dr. Frame								
horizontale verplaatsing (mm)	5,3	53	8,8	88	31,1	311	instabiel	instabiel
verticale verplaatsing (mm)	2,3	2,3	2,75	2,75	3,2	3,2	instabiel	instabiel
MatrixFrame								
horizontale verplaatsing (mm)	6,4	64	0,65	6,5	0,67	6,7	0,68	6,8
verticale verplaatsing (mm)	1,4	1,4	1,7	1,7	1,9	1,9	2,2	2,2

tabel 3.2

Profiel 380x380x16.6x27 met horizontale belasting								
initiele verplaatsing (mm)	50	50	50	50	50	50	50	50
verticale last (kN)	300	600	900	1200	1500	1800	2100	2400
Dr. Frame								
horizontale verplaatsing (mm)	3,65	9,2	17,19	26,31	39,68	79,15	326,8	instabiel
verticale verplaatsing (mm)	0,49	1	1,54	2,1	2,69	3,54	6,47	instabiel
MatrixFrame								
horizontale verplaatsing (mm)	0,9	1,8	2,7	3,7	4,8	5,9	7	8
verticale verplaatsing (mm)	0,3	0,6	0,9	1,1	1,4	1,7	2	2,2

tabel 3.3

4. Conclusies en aanbevelingen

Dat we op andere kanten alles anders doen blijkt niet helemaal waar. Hoewel er duidelijke verschillen zijn tussen de onderzochten programma's en codes zijn deze vaak te verklaren door zaken niet direct met de verschillende contingenten te maken hebben. Uit mijn onderzoek zijn meerdere conclusies te trekken, ook kan ik over een paar zaken een paar aanbevelingen doen. De conclusies en aanbevelingen heb ik verdeeld tussen die over de raamwerkprogramma's en die van de toetsingscriteria, te beginnen met de laatste.

Conclusies met betrekking to de twee toetsingscriteria

Als hier over toetsingscriteria en dergelijke gesproken wordt, wordt in onderstaande opsomming de criteria met betrekking tot het knikprobleem bedoeld.

- De toetsingscriteria blijken veel op elkaar te lijken. Hoewel ze in de verschillende codes anders van uiterlijk zijn is het mogelijk om ze één grafiek te plotten. Dan blijkt dat de vorm van beide knikcurven redelijk overheen komt.
- De Eurocode 3 is nauwkeuriger dan de LRFD specifications en veel nauwkeuriger de ASD specifications. Dit is een gevolg van de oorsprong van beide codes. Alle eurocodes zijn ontworpen door commissies die vaak direct of indirect zijn vastgesteld door de eu-commissie, hierdoor hebben vaak wetenschappers de macht als het gaat om het creëren van de codes. Dit terwijl de AISC een private partij is. Hier zijn wetenschappers wel in vertegenwoordigd, maar niet meer dan de constructeurs uit de maatschappij. Hierdoor is het ook nog steeds mogelijk dat de ASD nog steeds gebruikt wordt. Zolang de constructeurs er graag mee willen werken is hij nog toegestaan. Een strengere toetsingsregel zal op veel weerstand stuiten van oude machtige praktijk mensen.
- De Eurocode verricht meer handelingen dan AISC specifications. Dit is een logisch gevolg van bovenstaande conclusie.
- De slender classificatie is min of meer gelijk aan de doorsnedeklasse 4 classificatie. De reductie als gevolg hiervan is wel anders in de kniktoetsing. In de Eurocode 3 dient de effectieve oppervlakte bepaald te worden. In de specifications wordt er een factor geïntroduceerd die met vaste regels kan worden bepaald, deze factor reduceert de vloeispanning.

Aanbevelingen met betrekking to de twee toetsingscriteria

- Het zou best interessant om ook andere delen van AISC specifications te vergelijken met de eurocode. Misschien is er één code op een gebied wel veel mooier dan de andere en zou het niet raar zijn om die andere dan een beetje aan te passen.

- Er kan verder onderzoek gedaan worden in het rekening van de slankheid, hier gebruiken de twee codes andere methode voor. Wat dat verschil is ben ik in mijn onderzoek niet toe gekomen.

Conclusies met betrekking tot de twee raamwerkprogramma's

- Dr. Frame en MatrixFrame zijn met een andere filosofie ontworpen.
- Hierdoor rekenen beide programma's de constructie op een ander moment door.
- Doordat andere moment gebruiken beide programma's een andere wijze om tweede-orde effecten in kaart te brengen. De methode van matrixFrame zou in theorie nauwkeuriger moeten zijn.
- De wijze waarop Dr. Frame imperfecties in rekening brengt kan niet zomaar worden overgenomen door MatrixFrame.

Conclusies met betrekking tot de twee raamwerkprogramma's

- Er kan nog verder onderzoek gedaan worden naar de gevolgen van de verschillende rekenmethodes op de resultaten.
- Er kan onderzoek gedaan worden naar een mooie manier om in matrixframe imperfecties in rekening te brengen.
- Er kan onderzoek gedaan worden of er geen mogelijkheid is om de positieve kanten van Dr. Frame en MatrixFrame bij elkaar te brengen.

5. Verantwoording

De volgende materialen zijn gebruikt voor de totstandkoming van dit rapport.

- Stability design of semi-rigid frames van WF Chen, Y Goto en JYR Liew door Jhon Wiley en Sons Inc. in 1996.
- LRFD steel design using advanced analysis van WF Chen en SE Kim door CRC press inc in 1997
- De verplaatsingenmethode van W Nijenhuis door BV Uitgevermaatschappij Agon Elsevier in 1373
- Dictaten voor CT2051 en CT3121 en een oud master dictaat over tweede-orde effecten. (te vinden bij de heer Hoogenboom)
- Een powerpointpresentatie van Dep. of Computational Mechanics, AAU Esbjerg, Denmark
- De website van Dr. Ir. Vuik (TUDelft)
- De website van AISC
- De website van nederlandse normalisatie instituut.