

ir. D.C. Tjepkema en dr.ir. J. Maljaars

Daan Tjepkema is constructeur bij Arup in Amsterdam en Johan Maljaars is specialist metaalconstructies en mechanica van constructies bij TNO in Delft.

# Verskil in toetsmethoden plooigevoelige elementen

**Plaatvelden met een grote breedte-dikteverhouding, zoals de lijven van slanke, hoge liggers, kunnen plooigevoelig zijn. Voor de constructeur is het van belang om de weerstand van zulke plaatvelden te kunnen bepalen. De Nederlandse TGB 1990-serie kent twee toetsmethoden voor deze plaatvelden (doorsnedeklasse 4). Ook de Eurocode 3 kent er twee. Ondanks dezelfde naamgeving hebben twee van deze toetsmethoden verschillende theoretische achtergronden. Alle vier de methoden zijn vergeleken voor een grote range aan I- en T-profielen. De verschillen in weerstand blijken significant, met name voor ongesteunde plaatvelden.**

Slanke, plooigevoelige constructie-elementen (doorsnedeklasse 4) komen voor in bruggen en utiliteitsbouw omdat het efficiënt materiaalgebruik mogelijk maakt. Met name bij herberekeningen van bestaande constructie is er meer aan gelegen om de beschikbare weerstand optimaal te benutten. Het niet volledig uitnutten van de weerstand kan belangrijke impact hebben op eventuele versterkingsontwerpen. Het is dus van belang om veilige, maar niet te conservatieve toetsmethoden te hebben. De Eurocode heeft naast de bestaande NEN-methoden, nieuwe toetsmethoden aangereikt voor plooigevoelige elementen. In dit artikel zijn de methoden onderling vergeleken, en zijn er enkele analyses met de eindige-elementenmethode (EEM) uitgevoerd om inzicht te krijgen hoe de EEM zich verhoudt tot de toetsmethoden. Plooi door dwarskracht en/of de interactie hiervan met een normaalspanning blijft buiten beschouwing. Daar-

naast betreft het een vergelijk voor plaatvelden zonder dwars- of langsverstijvers.

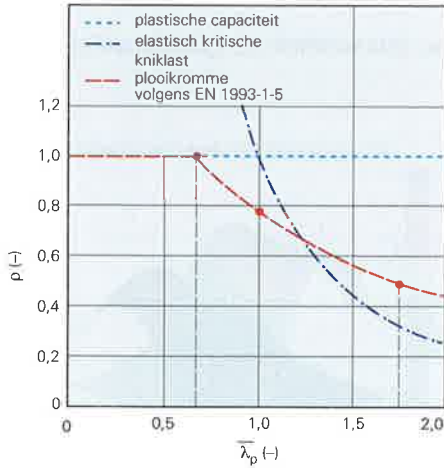
## Theorie voor een enkel plaatveld

Het plooien van een plaat is vergelijkbaar met het knikken van een kolom. Ook de toetsing gebeurt vergelijkbaar: men rekent eerst de relatieve slankheid uit, en kiest de juiste instabiliteitskromme. Uit de relatieve slankheid en de instabiliteitskromme volgt de reductiefactor waarmee de plastische capaciteit wordt vermenigvuldigd. Een belangrijk verschil tussen kolommen en platen is dat een plaat in veel gevallen een positief nakritisch gedrag vertoont, waardoor (voor platen met grote slankheid) een weerstand wordt gevonden die groter is dan de kritisch elastische belasting. Dit is zichtbaar in de instabiliteitskromme van *afbeelding 1*, waarbij voor een relatieve slankheid  $\lambda_p$  groter dan 1,2 de instabiliteitskromme (rode lijn) hoger uitkomt dan de elastisch kritisch kniklast (zwarte lijn). Om het verloop van de instabiliteitskromme nader te kunnen toelichten, is een EEM-model opgesteld van een op druk belaste plaat die aan beide randen scharnierend is gesteund. De lengte-breedteverhouding van de plaat is  $a:b = 7:1$ . Het gemodelleerde materiaalgedrag is elastisch-plastisch met een vloeigrens van  $355 \text{ N/mm}^2$ . Er zijn drie platen geanalyseerd met verschillende breedte/dikte verhoudingen, zodanig dat de slankheden van de drie platen gelijk zijn aan 0,67; 1,0 en 1,75 (grijs gestippelde lijnen in *afb. 1*). In *afbeelding 2* tot en met *4* is voor de drie platen de belasting uitgezet tegen de vervorming, met  $d_w$  is de maximale verplaatsing uit het vlak van de plaat,  $b$  is de breedte van de plaat en  $\sigma_{av}$  = de gemiddelde normaalspanning in de plaat (=  $F/A$ ). De elastisch kritische kniklast is weer-

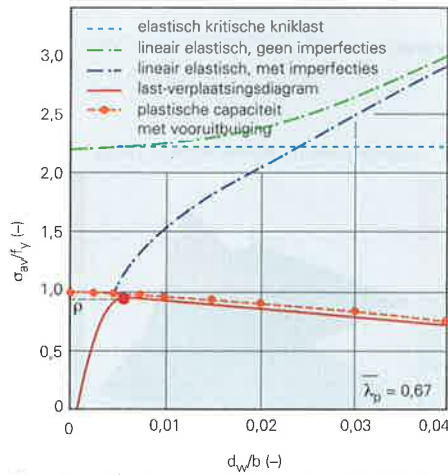
gegeven met gestippelde horizontale blauwe lijnen. De groene curven geven het nakritische gedrag van de plaat weer voor een plaat met lineair elastisch materiaalgedrag zonder initiële imperfecties. Het positieve nakritische gedrag kan worden toegeschreven aan het feit dat, na het optreden van plooi, de gesteunde randen van de plaat meer belasting kunnen opnemen dan het midden van de plaat, zoals aangetoond door Von Karman<sup>[6]</sup> en Winter<sup>[7]</sup> (*afb. 5*). Ook de donkerblauwe gestippelde curven zijn geldig voor lineair elastisch materiaal, echter dit keer is de plaat imperfect. De toegepaste initiële imperfectie – uitbuiging volgens de 1<sup>e</sup>-orde knikvorm met amplitude  $d_{wi}/b = 0,002$  en geen restspanningen – is in overeenstemming met tabel C2 uit EN 1993-1-5. De invloed van de imperfecties uit zich als het verschil tussen de blauwe en de groene curven. De oranje curven (met stippen) geven de plastische capaciteit van de platen weer voor verschillende waarden van de (initiële) uitbuiging. In tegenstelling tot de andere curven, geldt voor de oranje curven dat iedere stip het resultaat is van een individuele analyse. In iedere analyse heeft de plaat elastisch-plastisch materiaalgedrag. Er is geometrisch lineair gerekend, zodat het effect van de toename van de uitbuiging op de krachswerking niet is meegenomen. De curven laten zien dat de plastische capaciteit afneemt bij toenemende uitbuiging. Dat is het gevolg van het buigend moment in de plaat door de initiële vooruitbuiging. De rode curven tenslotte geven de resultaten weer van een geometrisch en materiaal niet-lineaire analyse inclusief de invloed van imperfecties (GMNIA). Deze analyses geven het werkelijke gedrag van de platen het beste weer. Duidelijk zichtbaar is dat het gedrag wordt begrenst



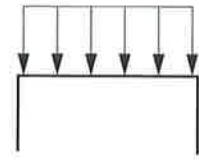
$$\rho = \frac{b_{eff} \cdot t}{b \cdot t} = \frac{\sigma_r}{f_y}$$



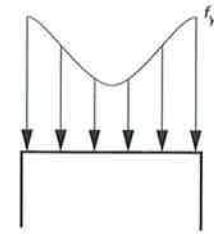
1. Instabiliteitskromme volgens EN 1993-1-5 voor een op druk belaste interne plaat.



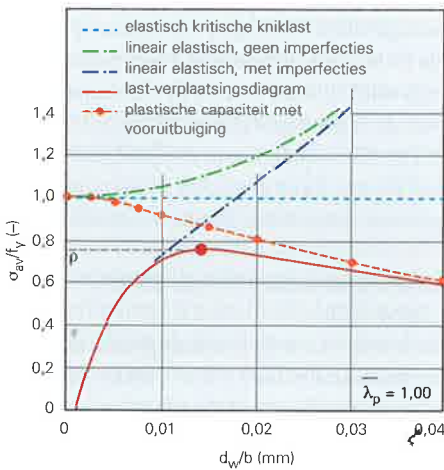
2. Last-verplaatsing voor plaat met slankheid 0,67.



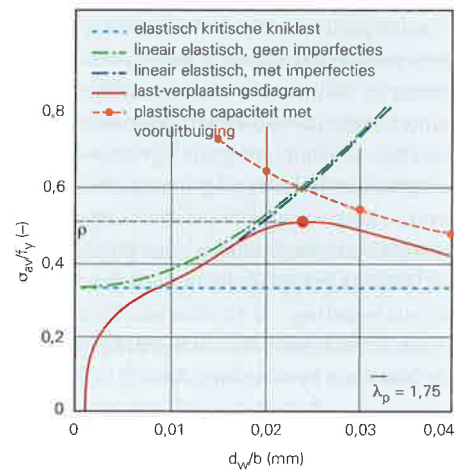
a. spanningsverdeling vóór plooiën.



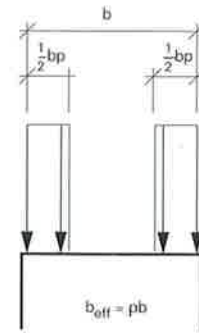
b. spanningsverdeling nakritisch gebied



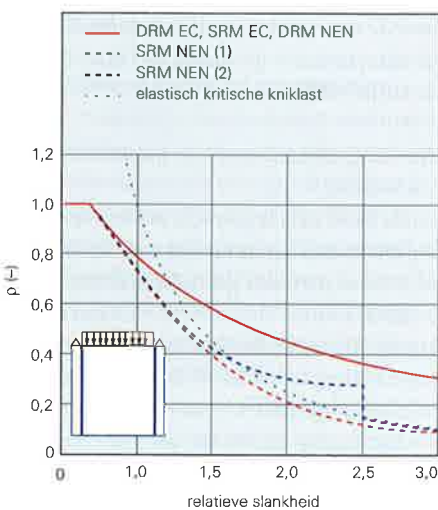
3. Last-verplaatsing voor plaat met slankheid 1,00.



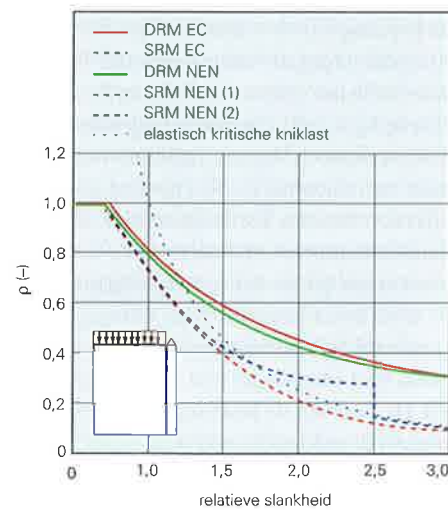
4. Last-verplaatsing voor plaat met slankheid 1,75.



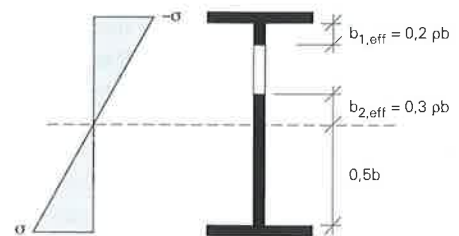
c. schematisering spanningsverdeling fig. b volgens [5, 6]



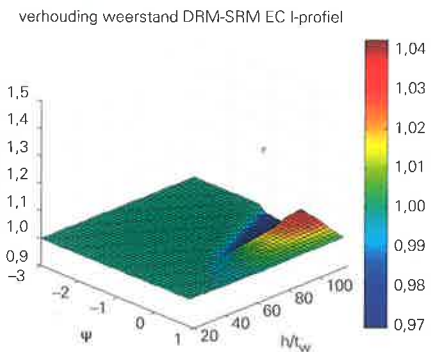
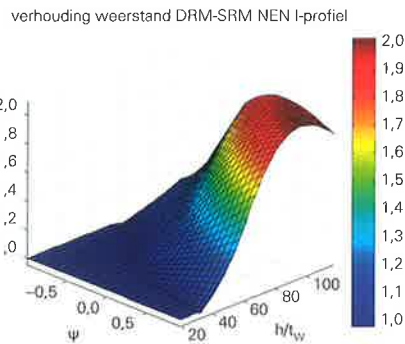
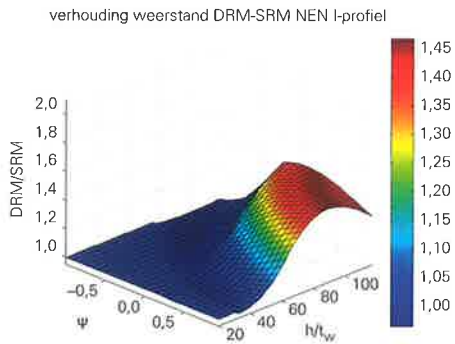
7. Instabiliteitskrommen voor normaalkracht.



5. Verschuiving van de belasting naar de randen van de plaat in het nakritisch gebied en schematisering daarvan volgens Von Karman<sup>[5]</sup> en Winter<sup>[6]</sup>. (a) Spanningsverdeling vóór plooiën. (b) Spanningsverdeling nakritisch gebied. (c) Schematisering spanningsverdeling van (b) volgens [5] en [6].

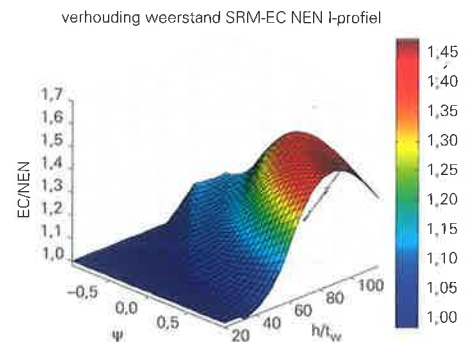
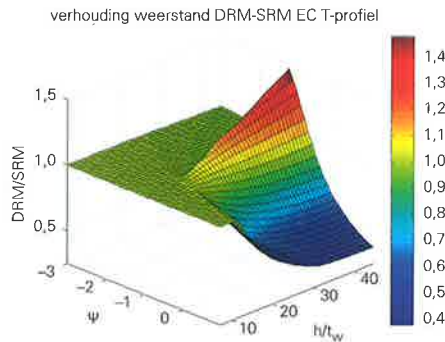
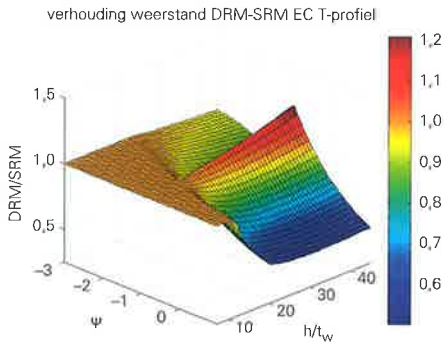


6. Effectieve doorsnede DRM-EC3 en DRM-NEN bij zuivere buiging.



8. SRM-NEN/DRM-NEN I-profiel zonder flens (l) en met flens (r).

9a. SRM-EC3/DRM-EC3 I-profiel zonder flens.



11. SRM-EC3/DRM-EC3 T-profiel zonder flens (l) en met flens (r).

12a. SRM-NEN/SRM-EC I-profiel.

door enerzijds de donkerblauwe curven en anderzijds de oranje curven. *Afbeelding 2* laat zien dat de weerstand van de gedrongen plaat (het maximum van de rode curve) ongeveer gelijk is aan de plastische capaciteit van deze plaat zonder. Plooi speelt nauwelijks een rol voor deze gedrongen plaat. Uit *afbeelding 3* blijkt dat de weerstand van een plaat met slankheid  $\lambda_p = 1,00$  lager is dan zowel de elastisch kritische kniklast als de plastische capaciteit van de plaat. Voor de zeer slanke plaat ( $\lambda_p = 1,75$ ) geldt dat de weerstand groter is dan de elastisch kritische kniklast. Dat gaat gepaard met een relatief grote uitbuiging van de plaat. De weerstand van de drie platen is met rode stippen weergegeven in *afbeelding 1*. De weerstand van de platen komt goed overeen met de instabiliteitskromme voor de DRM in EN 1993-1-5.

### Beschrijving toetsmethoden

In het voorgaande is ingegaan op de plooiweerstand van een individuele plaat. Hoe zit het met de plooiweerstand van een profiel, opgebouwd uit platen? Daarvoor zijn verschillende toetsmethoden beschikbaar, die hieronder worden toegelicht.

#### Spanningsreductiemethode NEN 6771 (SRM-NEN).

Dit is de meest uitgewerkte toetsmethode voor plooi in de TGB 1990. De methode gaat uit van een begrenzing van de spanning in het profiel. Er zijn twee 'submethoden' opgenomen voor de bepaling van de weerstand

van een plaatveld. Bij submethode 1 wordt geen positief nakritisch gedrag in rekening gebracht. De instabiliteitskromme ligt dus geheel onder die van de kritisch elastische kniklast. Dit kan nuttig zijn bijvoorbeeld vanuit esthetisch oogpunt (plooiervorming wordt voorkomen) of om vermoeiing ten gevolge van *web-breathing* – het plooiën en rechte van het lijf onder invloed van fluctuerende belasting – te voorkomen. Bij submethode 2 wordt het nakritisch gedrag in geringe mate in rekening gebracht (*afb. 7*).

#### Doorsnedereductiemethode NEN 6770 (DRM-NEN).

In de DRM-NEN wordt wel rekening gehouden met het positieve nakritisch gedrag in de bepaling van de weerstand van een plaat. Er wordt uitgegaan van een effectief deel en een ineffectief deel van de doorsnede, in navolging van de schematisering volgens Von Karman en Winter. Theodore von Karman introduceerde in 1932 het concept van effectieve breedte. De daadwerkelijk optredende spanningen in de doorsnede worden vereenvoudigd tot een constante spanning in de effectieve doorsnede, zoals weergegeven in *afbeelding 5*. *Afbeelding 6* geeft een voorbeeld voor een I-ligger met een plooi gevoelig lijf. De aard van de belasting op het profiel bepaalt de reductie van de doorsnede. De delen van de doorsnede die het meest gevoelig zijn voor plooi, wordt materiaal niet in rekening gebracht bij bepaling van de doorsnede-eigenschappen. De methode levert in

veel gevallen een hogere weerstand op dan de SRM-NEN, bijvoorbeeld bij I-profielen met slanke lijven, waarbij de vloeicapaciteit van de flenzen gebruikt wordt in de DRM-NEN. Consequentie van de DRM-NEN is dat de weerstand gepaard kan gaan met het plooiën van een deel van de doorsnede.

#### Doorsnedereductie methode EN 1993-1-5 (DRM-EC3).

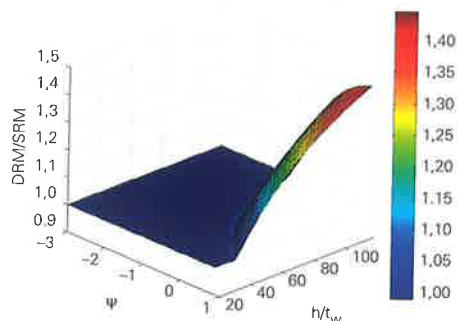
De DRM-EC3 is de meest uitgewerkte methode in EN 1993-1-5. De DRM-EC3 is vergelijkbaar met de DRM-NEN, maar uitgebreider. Zo wordt in de DRM-EC3 een volledige methode beschreven om de weerstand van een plaatveld met verstijvers te bepalen. Bij een niet-constante spanning over de doorsnede verschilt de formule voor de reductiefactor ( $\rho$ ) tussen de DRM-EC3 en de DRM-NEN.

#### Spanningsreductie methode EN 1993-1-5 (SRM-EC3).

Bij de SRM-EC3 is getracht om een eenvoudig alternatief aan te bieden voor de DRM-EC3. Deze methode gebruikt dezelfde instabiliteitskromme als de DRM-EC3 om te komen tot een reductiefactor  $\rho$ . Echter in tegenstelling tot de DRM-EC3 wordt  $\rho$  vervuld met de rekenwaarde van de vloeispanning, om tot een gereduceerde vloeispanning te komen. Die gereduceerde vloeispanning wordt in SRM-EC3 toegepast in de toetsing. Voor enkele plaatvelden kan dit een diktereductiemethode worden

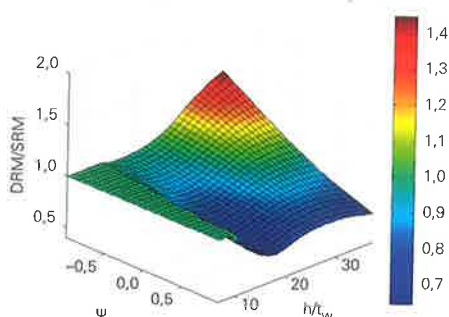


verhouding weerstand DRM-SRM EC I-profiel



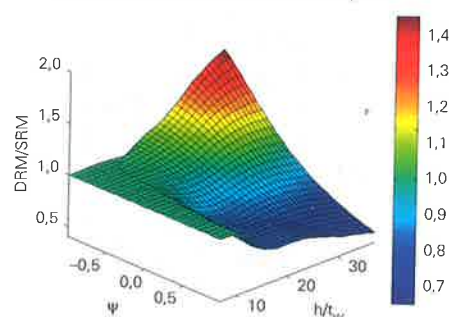
9b. SRM-EC3/DRM-EC3 I-profiel met flens.

verhouding weerstand DRM-SRM NEN T-profiel

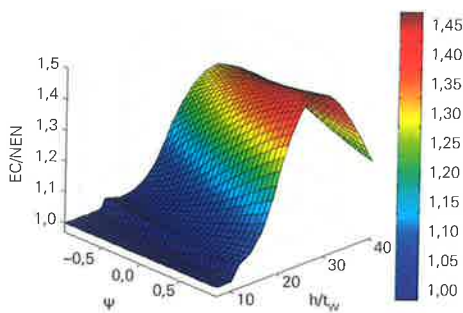


10. SRM-NEN/DRM-NEN T-profiel zonder flens (l) en met flens (r).

verhouding weerstand DRM-SRM NEN T-profiel

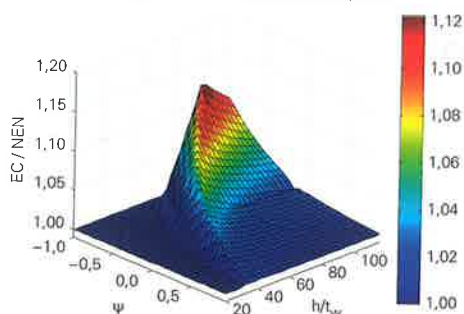


verhouding weerstand SRM-EC NEN T-profiel



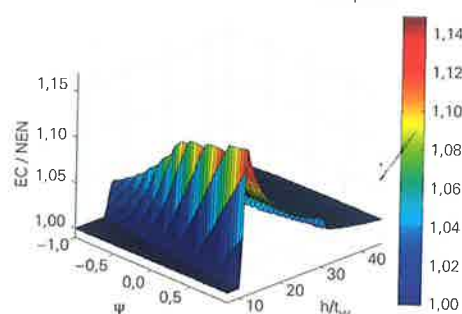
12b. SRM-NEN/DRM-EC T-profiel.

verhouding weerstand DRM-EC NEN I-profiel



13. DRM-NEN/DRM-EC I-profiel (l) en T-profiel (r).

verhouding weerstand DRM-EC NEN T-profiel



genoemd. Omdat dezelfde instabiliteitskrommes worden gebruikt als voor de DRM-EC3, wordt het positieve nakritisch gedrag in rekening gebracht in de SRM-EC3. Dit in tegenstelling tot de SRM-NEN. Ondanks het feit dat de SRM-EC3 en SRM-NEN dezelfde naamgeving kennen, zijn zij dus gestoeld op een andere theoretische achtergrond. Voor alle toetsmethoden geldt dat de plaatranden als scharnierend zijn aangehouden. Eventuele rotatiesteun aan het slanke lijf vanuit de flenzen wordt dus niet in rekening gebracht. Bij de instabiliteitskrommen in *afbeelding 7* moet worden opgemerkt dat ze gelden voor plaatvelden onder een constante drukspanning. Een ander verloop wordt gevonden wanneer er een spanningsgradiënt aanwezig is.

### Vergelijking toetsmethoden

Om de verschillen tussen de toetsmethoden te kwantificeren, is voor een grote range aan profielafmetingen de weerstand volgens de toetsmethoden bepaald. De vergelijking is gemaakt voor symmetrische I-profielen en voor T-profielen van S355, dus met respectievelijk een tweezijdig en een enkelzijdig gesteund, plooigevoelig lijf. De volgende parameters zijn gevarieerd.

1. Verhouding lijfhoogte/lijfdikte  $h_w/t_w$ .
2. Spanningsverdeling  $\psi$  ( $\psi = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ ).
3. Oppervlak van de flenzen ( $b_f t_f$ ).

Voor het T-profiel met spanningsgradiënt is de grootste drukspanning aangebracht in

het ongesteunde einde van het lijf. Om de verschillen tussen de methoden te tonen is de verhouding tussen de weerstanden van steeds twee methoden gegeven voor een range aan spanningsverdelingen ( $\psi$ ) en slankheden. De vergelijkingen zijn gemaakt onder de volgende voorwaarden en aannamen.

- Effecten door al dan niet gelijktijdig optreden van dwarskracht zijn buiten beschouwing gelaten.
- Er is geen materiaal in de aansluiting tussen lijf en flenzen, zoals afrondingsstraal of lasvolume, in rekening gebracht.
- Er zijn geen verstijvers toegepast.

### Iteratie bij doorsnedereductiemethode

Aangezien de positie van de neutrale lijn van de effectieve doorsnede verschilt van die van de volledige doorsnede, kan het nodig zijn om te itereren bij het bepalen van de effectieve doorsnede. Volgens EN 1993-1-5 4.4 (3) is iteratie niet nodig voor het I-profiel en wel voor het T-profiel. Desalniettemin is er voor alle doorsneden geïtereerd, met een tolerantie van  $10^{-6}$ . De tolerantie is voornamelijk zo klein aangehouden om te zorgen dat gevonden verschillen tussen de methoden niet worden beïnvloed door het aantal iteraties.

### Resultaten

In de 3D-grafieken van *afbeeldingen 8* tot en met *13* is op de verticale z-as de ratio van de weerstanden van de twee methodes weergegeven. De horizontale assen zijn de spanningsverdeling ( $\psi$ ), en de slankheid ( $h/t$ ) van

het plooigevoelige lijf. Er zijn steeds twee plots gegeven. Eén geval zonder flenzen – een enkele plaat – en één geval met flenzen van 200x10 mm.

*Afbeelding 8* geeft de resultaten van de vergelijking tussen de SRM-NEN en de DRM-NEN voor een I-profiel. *Afbeelding 9* bevat hetzelfde, maar hier betreft het een vergelijk voor de SRM-EC3 met de DRM-EC3. In *afbeelding 10* zijn de resultaten van het vergelijk voor een T-profiel met de SRM-NEN en de DRM-NEN weergegeven. *Afbeelding 11* toont de resultaten van het vergelijk van de SRM-EC3 en de DRM-EC3. Hiervoor werd steeds de SRM vergeleken met de DRM, van zowel de NEN als de Eurocode. In *afbeelding 12* is het vergelijk van de SRM van de NEN en de Eurocode. In *afbeelding 13* zijn de resultaten van het vergelijk met de DRM van de NEN en de Eurocode weergegeven. De volgende zaken vallen op.

- De verschillen tussen DRM-NEN en DRM-EC3 zijn relatief klein: De weerstand bepaald met de DRM-EC3 is tot maximaal 14% groter voor de beschouwde profielen. Dit verschil komt alleen tot uiting bij spanningsverdelingen die niet constant zijn over de doorsnede.
- De SRM-NEN geeft voor gesteunde plaatvelden de laagste waarde voor de weerstand. Het uitgangspunt bij deze methode is ook verschillend van de andere drie methodes: in de SRM-NEN wordt het nakritische gedrag minder in rekening gebracht.
- De SRM-methodes zijn voor een I-profiel

**Literatuur**

1. *NEN 6770* (TGB 1990. Staalconstructies. Basiseisen en basisrekenregels voor overwegend statisch belaste constructies), 1997 + A1, 2001. 2. *NEN 6771* (TGB 1990. Staalconstructies. Stabiliteit), 2000 + A1, 2001. 3. *NEN-EN 1993-1-5* (Eurocode 3. Ontwerp en berekening van staalconstructies. Deel 1-5: Constructieve plaatvelden), 2006 + NB, 2011. 4. *NEN-EN 1993-1-6* (Eurocode 3. Ontwerp en berekening van staalconstructies. Deel 1-6: Algemene regels - Sterkte en Stabiliteit van Schaalconstructies), 2007 + NB, 2011. 5. S.P. Timoshenko en J.M. Gere, *Theory of Elastic Stability*, McGraw Hill Book Company, New York 1961. 6. T. Von Karman, E.E. S echler, L.H. Donnell, 'The strength of thin plates in compression', *Transactions of the American society of mechanical engineers* 54 (1932), p. 53-56. 7. G. Winter, 'Strength of thin steel compression flanges', *Transactions of the American society of civil engineers* 112 (1947), p. 527-554.

**Tabel 1. I-profiel belast op buiging.**

	doorsnedegroot-heden	weerstand GMNIA	toetsmethode	weerstand toetsmethode/GMNIA
	$h = 1228 \text{ mm}$ $b_f = 300 \text{ mm}$ $t_w = 10 \text{ mm}$ $t_f = 14 \text{ mm}$	$N_u = 0 \text{ kN}$ $M_u = 2480 \text{ kNm}$	SRM-EC3	0,91
			DRM-EC3	0,99
			SRM-NEN	0,82
			DRM-NEN	0,96
		$N_u = 0 \text{ kN}$ $M_u = 2440 \text{ kNm}$	SRM-EC3	0,93
			DRM-EC3	1,01
			SRM-NEN	0,83
			DRM-NEN	0,97

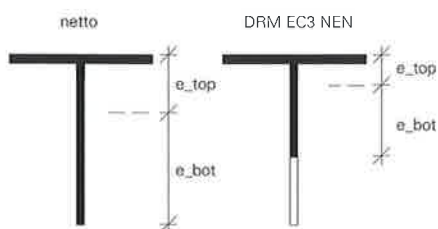
**Tabel 2. I-profiel belast op druk.**

	doorsnedegroot-heden	weerstand GMNIA	toetsmethode	weerstand toetsmethode/GMNIA
	$h = 1228 \text{ mm}$ $b_f = 300 \text{ mm}$ $t_w = 10 \text{ mm}$ $t_f = 14 \text{ mm}$	$N_u = 4441 \text{ kN}$	SRM-EC3	0,57
			DRSM-EC3	1,01
			SRM-NEN	0,21
			DRM-NEN	1,00
		$N_u = 4321 \text{ kN}$	SRM-EC3	0,59
			DRM-EC3	1,03
			SRM-NEN	0,22
			DRM-NEN	1,03

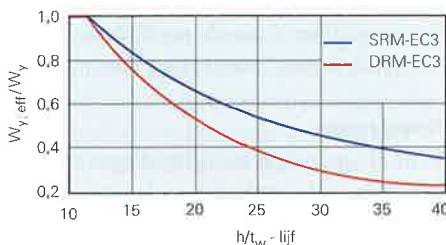
**Tabel 3. T-profiel vergelijk methoden**

	doorsnedegroot-heden	weerstand GMNIA	toetsmethode	weerstand toetsmethode/GMNIA
	$h = 256 \text{ mm}$ $b_f = 300 \text{ mm}$ $t_w = 10 \text{ mm}$ $t_f = 14 \text{ mm}$	$N_u = 1071 \text{ kN}$ $M_u = 10.2 \text{ kNm}$	SRM-EC3	0,92
			DRM-EC3	0,48
			SRM-NEN	0,56/0,64*
			DRM-NEN	0,46
		$N_u = 515 \text{ kN}$ $M_u = 4.9 \text{ kNm}$	SRM-EC3	1,91
			DRM-EC3	1,00
			SRM-NEN	1,18/1,33*
			DRM-NEN	0,95

\*) SRM-NEN-methode 1, respectievelijk -methode 2



14. Reductie doorsnede en weerstandsmoment.



altijd conservatiever dan de DRM-metho-des, vooral wanneer er grote verschillen in slankheid van de flenzen en het lijf bestaan. Dit komt onder andere doordat de gereduceerde spanning  $p_{fy}$ , berekend voor het lijf, ook voor de flenzen toegepast wordt, ook wanneer de flenzen niet plooi gevoelig zijn. Dit is een belangrijk conservatisme in de SRM-EC3 voor dit type profiel.

- De meest opvallende verschillen worden gevonden wanneer de beide DR-methoden vergeleken worden met de SR-methoden voor een T-profiel. Bij T-profielen belast met een combinatie van buiging en normaal-kracht blijken de SR-methoden een hogere weerstand op te leveren. Dit geldt met name voor de SRM-EC.

Het laatstgenoemde aspect druist in tegen de initiële verwachting, omdat de SRM-EC3 een vereenvoudigde toets is, die wordt geacht conservatief te zijn. De oorzaak hiervan wordt nader beschouwd. Bij de reductie van het ongesteunde lijf met de DRM, zijn er twee effecten die tot een lagere weerstand leiden. Ten eerste wordt in de DRM-methoden de reductiefactor ( $\rho$ ) toegepast op het deel van de doorsnede dat zich in de uiterste vezel bevindt. Dit beïnvloed de weerstand sterker dan bij toe-passing van de SRM-EC3.

Ten tweede verschuift hierdoor de neutrale lijn, wat een extra moment oplevert door een aanwezige normaalkracht.

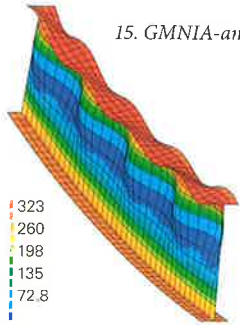
De oorzaak ligt dus in zowel het sterker reduceren van het weerstandsmoment, als in het extra moment door excentrische belasting en de verschuivende neutrale lijn. Met de SRM-EC3 worden deze aspecten genegeerd. In afbeelding 14 is de reductie in termen van het weerstandsmoment weergegeven. Hier komt het benoemde effect van de excentrische normaalkracht nog bij.

**GMNIA EEM-analyse**

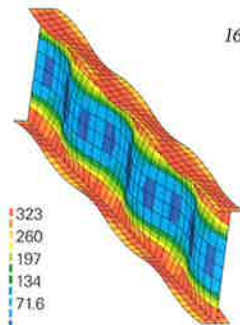
Aangezien de verschillen tussen de toetsmetho-des groot blijken, zijn de resultaten geve-rifieerd met EEM-analyses. Deze GMNIA (Geometrisch niet-lineair, Materiaal Niet-lineaire analyses met Imperfecties) zijn uit-gevoerd met het eindige-elementenprogram-ma DIANA versie 9.3.4. De imperfecties uit tabel C2 van EN 1993-1-5 zijn aangehouden.



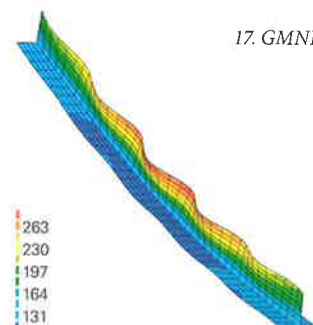
15. GMNIA-analyse I-profiel in buiging.



16. I-profiel belast op druk.



17. GMNIA voor T-profiel.



De verificatie geeft enkel een indicatie, omdat slechts drie EEM-berekeningen zijn uitgevoerd. Het doel is het verkrijgen van inzicht. Voor het verifiëren of falsificeren van één of meerdere toetsingsmethodes zijn meer EEM-analyses nodig. Er zijn drie cases onderzocht: een I-profiel belast op buiging, een I-profiel belast op normaalkracht en een T-profiel belast op een combinatie van normaalkracht en buiging. De afmetingen zijn zodanig gekozen, dat grote verschillen in weerstand tussen de verschillende toetsingsmethodes resulteren. Voor iedere case zijn twee varianten beschouwd: één met de werkelijke doorsnede en één niet-bestaande variant waarbij scharnierende verbindingen zijn aangebracht tussen het lijf en de flenzen. De reden om deze laatste variant te beschouwen is dat de rotatiesteun die de flenzen veroorzaken niet in rekening gebracht wordt in de toetsingsmethoden. Zodoende zou deze laatstgenoemde variant overeen moeten komen met de toetsmethodes.

## Resultaten

Afbeelding 15 toont de spanning (in kleuren) en de vervorming (geschaald met factor 15) van het op buiging belaste I-profiel bij het bereiken van de weerstand. In tabel 1 is de weerstand van de verschillende toetsingsmethodes vergeleken met het resultaat van de EEM-analyse. Het blijkt dat de DRSM-EC3 resultaten oplevert die het meest overeen komen met de analyse. De SRM-NEN is in grijs weergegeven aangezien deze methode met opzet het nakritisch gedrag vrijwel niet in rekening brengt, en dus met opzet een verschil zal geven met de GMNIA. Hetzelfde is uitgevoerd voor een I-profiel belast op druk. Afbeelding 16 geeft de spanningsverdeling en vervorming van het op druk belaste I-profiel bij het bereiken van de weerstand. De weerstanden van de verschillende methodes zijn opgenomen in tabel 2. Het valt hierbij op dat de doorsnedereductie-methodes beide de weerstand uit de GMNIA goed benaderen. De SRM-EC3 blijkt een veel lagere weerstand op te leveren en is dus conservatief. Voor het T-profiel blijken de verschillen tussen de verschillende methodes het grootst. Afbeelding 17 geeft de vervorming en de

spanning van het T-profiel bij het bereiken van de weerstand. In tabel 3 zijn de weerstanden van de verschillende methodes met de bezwijklast van de GMNIA weergegeven. Er is een groot verschil tussen de GMNIA-berekeningen met en zonder scharnier. Zoals verwacht komen de DRS-methodes goed overeen met GMNIA-berekeningen voor de variant met scharnier. Voor deze variant geeft de SRM-EC3 een veel te hoge weerstand, dit is niet in overeenstemming met het theoretische model waarin de plaatranden als scharnierend zijn verondersteld. Voor dit specifieke geval worden we 'gered' door de steungevende werking van de flens: die is zodanig groot dat zelfs SRM-EC3 nog net een veilige waarde geeft wanneer deze wordt vergeleken met de draagkracht van het werkelijke profiel. Gezien het resultaat is het echter goed mogelijk dat voor profielen met andere afmetingen een onveilige waarde van de weerstand wordt verkregen met SRM-EC3.

## Conclusies

De vier vergeleken toetsingsmethodes geven significante verschillen in de draagkracht. De twee belangrijkste aspecten die tot de verschillen leiden zijn als volgt.

1. De instabiliteitskrommen. Het positieve nakritische gedrag kan wel of niet zijn meegenomen in de instabiliteitskromme. De kromme regelt daarmee of de weerstand volgens de toetsmethode gelijk wordt gesteld aan het bereiken van de kritische plooi spanning of aan het bereiken van de uiterste draagkracht.
2. Reductie van de doorsnede. Hoe de reductiefactor  $\rho$  volgend uit de instabiliteitskromme wordt toegepast kan tot grote verschillen in weerstand leiden. De reductie kan ofwel toegepast worden op de spanning of op de doorsnede. Bij de spanningsreductie wordt ook de spanning in de niet plooi gevoelige flenzen begrenst. Bij de doorsnedereductie wordt enkel dat deel van de doorsnede gereduceerd waar plooi optreedt, en het effect hiervan op de doorsnede én krachtswerking beschouwd.

In de SRM van NEN 6771 is het nakritisch gedrag bewust niet of nauwelijks in rekening gebracht. In lijn met deze theorie is de spanning dan ook gelimiteerd voor het plooi

gevoelige onderdeel. De DRM van zowel de EN 1993-1-5 als de NEN 6770 brengen het nakritisch gedrag in rekening en het effect van het reduceren van de doorsnede van de plooi gevoelige elementen kan worden beschouwd op het totaal van de doorsnede. Dit is in overeenkomst met de theoretische achtergrond.

De beide DRM hebben een gedegen theoretische basis. Een vergelijking met enkele berekeningen met de eindige-elementenmethode laat een goede overeenkomst zien met de DRM van zowel NEN als EN 1993-1-5. Met de SRM van EN 1993-1-5 is getracht een eenvoudig alternatief aan te bieden voor de DRM van dezelfde norm. De methode maakt gebruik van dezelfde instabiliteitskromme als de DRM, maar nu wordt de reductie toegepast op de spanning. Dit is niet volledig in overeenstemming met de theoretische achtergrond en kan bij ongesteunde platen tot significante overschatting van de weerstand leiden.

Gezien de gevonden verschillen met de DRM en de EEM en de inconsistente theoretische achtergrond, raden de auteurs af om de SRM van EN 1993-1-5 op ongesteunde platen en T-profielen toe te passen. Wanneer gebruik gemaakt wordt van een andere methode dan de SRM in NEN 6771 (1), is het belangrijk dat een aanvullende toets op vermoeiing door *web breathing* wordt uitgevoerd.

Het is mogelijk om een grotere weerstand te verkrijgen voor plooi gevoelige doorsneden dan de toetsingregels in de normen aangeven door de weerstand te bepalen met een EEM-model. Met dat model kan de gedeeltelijke inklemming van het lijf door de flenzen namelijk in rekening worden gebracht. •