

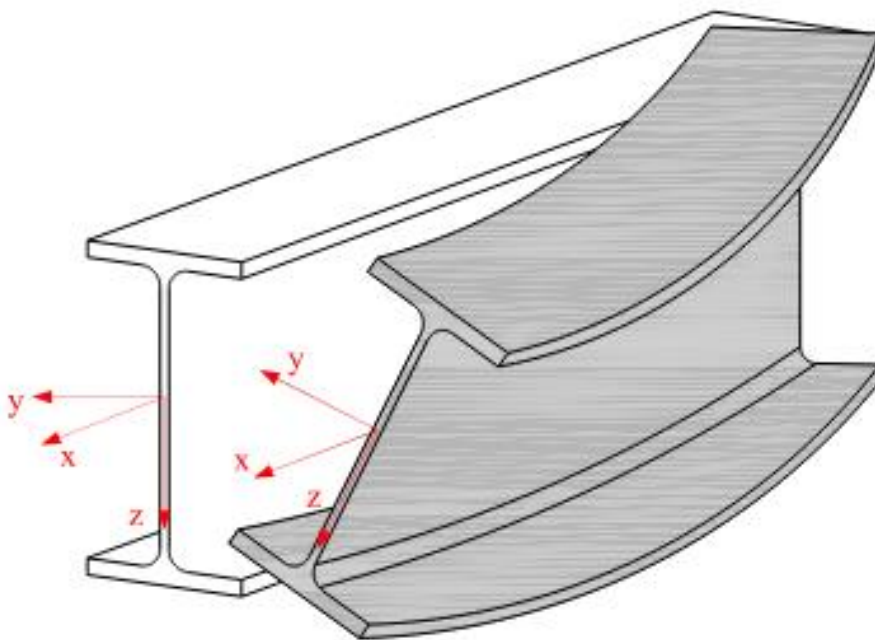
Kipstabiliteit onder invloed van axiale trek

Masterdissertatie - onderzoeksrapport

Master in Structural Engineering

Davy Otte

10 juni 2023



Kipstabiliteit onder invloed van axiale trek

Masterdissertatie - onderzoeksrapport

Optimalisatie toetsing kipstabiliteit met vereenvoudigde
toetsingsmethode voor gesteunde liggers in gebouwen

Auteur

Davy Otte

Opleidingsinstantie

Hogeschool van Amsterdam

Studie

Master in Structural Engineering

1^o beoordelaar

Dhr. M. B. Pegman MSEng

2^o beoordelaar

Dhr. Ir. R.A.J.M. Mom

Onderdeel

Onderzoeksrapport

Versie

1.0 Definitief

Datum

10 juni 2023

© 2022 Copyright Hogeschool van Amsterdam

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door print-outs, kopieën, of op welke manier dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de Hogeschool Amsterdam.

Voorwoord

Dit afstudeeronderzoek is geschreven als afronding van de masteropleiding Structural Engineering aan de Hogeschool van Amsterdam. Het afstudeeronderzoek heeft als doel dat de auteur kan laten zien dat hij aan de einkwalificaties van de opleiding voldoet.

Als onderwerp voor dit afstudeeronderzoek is het fenomeen kipstabiliteit gekozen. Toetsing van liggers op kipstabiliteit kan volgens Eurocode 3 op drie manieren plaatsvinden: toetsingen op basis van algemene kipprommen, toetsing op basis van kipprommen voor gewalste profielen en toetsing volgens de vereenvoudigde methode. De vereenvoudigde methode is tevens een conservatieve methode, die sterk ongunstig is ten opzichte van beide toetsingen met kipprommen. Verder is weinig bekend over de invloed van een axiale trekkracht op de kipstabiliteit en zijn hier ook geen rekenregels voor. Door dit onderwerp te benaderen, is geprobeerd om invulling te geven aan de onbekendheid en mogelijk ook aan de onduidelijkheid over de combinatie van axiale trek en kipstabiliteit.

Dit afstudeeronderzoek zou niet mogelijk zijn geweest zonder de hulp en ondersteuning van diverse personen. Voor de begeleiding en inhoudsvolle feedback vanuit de Hogeschool van Amsterdam wil ik Michel Pegman en René Mom danken. Verder dank ik mijn vader Leen Otte die gezorgd heeft dat ik deze opleiding kon volgen en mij hiervoor ook altijd de tijd en ruimte gaf. Daarnaast wil ik mijn vrouw Zwanenliën Otte hartelijk danken voor het geduld dat ze heeft gehad tijdens het onderzoek en de motivatie die zij mij tijdens het onderzoek heeft gegeven.

Krabbendijke, 10 juni 2023

Davy Otte

Samenvatting

Kipinstabiliteit is het bezwijken van een ligger waarbij de gedrukte flens zijdelings wegdraait en de ligger roteert om de ligger-as. Bij het toetsen van deze instabiliteitsvorm volgens Eurocode 3 heeft de ontwerper keuze uit drie methodes: twee daarvan zijn gebaseerd op kipkrommen en de derde methode wordt omschreven als de vereenvoudigde toetsingsmethode. In dit onderzoek is de oorzaak van het conservatisme in deze vereenvoudigde methode onderzocht en gekeken hoe deze methode verbeterd kan worden en tegelijk eenvoudig kan worden gehouden. Daarnaast is gekeken hoe effectief een axiale trekkracht werkt op de kipinstabiliteit.

Om dit onderzoek vorm te geven is de volgende onderzoeksvraag omschreven:

Op welke wijze dient de conservatieve vereenvoudigde toetsingsmethode verbeterd te worden, waarbij tevens de gunstige invloed van trek is meegenomen?

Om goed in beeld te krijgen hoe conservatief de vereenvoudigde methode is in vergelijking met de methodes met kipkrommen, zijn zeven verschillende mechanicaschema's onderzocht, variërend in lastpositie, profiel en overspanning. Hieruit blijkt dat er grote verschillen zijn tussen deze toetsingsmethodes voor kipstabiliteit. Bij een korte ligger werkt de vereenvoudigde toetsingsmethode soms juist gunstiger dan de methode met kipkrommen. Bij grote overspanningen is de vereenvoudigde methode echter zeer conservatief.

De kipreductiefactor χ_{LT} wordt bepaald door de relatieve kipslankheid. Aangezien de vereenvoudigde methode in het mechanisch model de ligger schematiseert als de gedrukte flens, wordt bij deze relatieve kipslankheid geen rekening gehouden met de torsiestijfheid van de ligger en de positie van de belasting ten opzichte van het dwarskrachtcentrum. Door de torsiestijfheid te negeren, wordt de stabiliserende werking door lijfbuiging verwaarloosd. Eveneens wordt met de vereenvoudigde methode de stabiliserende werking van de getrokken liggerflens verwaarloosd. Ook is de positie van de belasting op de ligger een belangrijke factor.

De gunstige werking van een axiale trekkracht is onderzocht. Deze axiale trekkracht heeft een gunstige werking op kipinstabiliteit. Door het uitvoeren van een geometrisch niet-lineaire analyse (GNA) en een geometrisch en materiaal niet-lineaire analyse met imperfecties (GMNIA) is zowel aan de voor- als aan de achterzijde van een toetsing op kipstabiliteit de gunstige werking gecontroleerd. Uit het onderzoek blijkt dat het verwaarlozen van de gunstige werking door de torsiestijfheid en de getrokken liggerflens zeer conservatief is. Tevens blijkt dat de reductiefactor χ_{LT} gemiddeld gelijkmatig toeneemt en dat het gunstige effect van een axiale trekkracht bij een IPE-profiel circa twee keer zo groot is dan bij een HEA-profiel. Het onderzoek heeft geresulteerd in een aanpassing van de vereenvoudigde methode waarbij de invloed van de torsiestijfheid en de lastpositie geïmplementeerd is in de vereenvoudigde toetsingsmethode. Tevens zijn er aanbevelingen gedaan om bij toetsing van kipstabiliteit de invloed van trek mee te nemen.

Inhoudsopgave

Voorwoord	3
Samenvatting	4
Figurenlijst	8
Tabellenlijst	9
Afkortingen en symbolen.....	10
Engelse afkortingen.....	10
Symbolen.....	10
Griekse letters.....	11
1. Inleiding	12
1.1 Aanleiding.....	12
1.2 Probleemstelling	13
1.2.1 Vereenvoudigde toetsingsmethode & k_c -factor	13
1.2.2 Effect axiale trekkracht	13
1.3 Doelstelling	14
1.4 Onderzoeksopzet	14
1.4.1 Onderzoeksvragen.....	15
1.4.2 Onderzoekstructuur	15
1.4.3 Leeswijzer	15
2. Theoretisch kader	16
2.1 Kipinstabiliteit	16
2.1 Vereenvoudigde methode voor gesteunde liggers in gebouwen – 6.3.2.4	17
3.1.1 Mate van conservatisme vereenvoudigde methode voor gesteunde liggers in gebouwen	18
3.1.2 Relatieve kipslankheid λ_{LT}	20
3.2 Torsiestijfheid.....	24
3.3 Trekkracht in combinatie met kipstabiliteit.....	26
Invloed axiale trekkracht - toetsingsmethoden met kippkrommen.....	26
Invloed axiale trekkracht - vereenvoudigde toetsingsmethode	27
3.4 k_c -factor.....	28

4.	Numeriek onderzoek	29
4.1	Aanleiding en doel	29
4.2	Aanpak.....	29
4.3	Modelleren plaatmodellen in RFEM.....	30
4.3.1	Liggermodellen.....	30
4.3.2	Imperfecties - GMNIA	32
4.3.3	Rekenmodellen	33
4.3.4	Analyses.....	33
4.3.5	Beschouwde mechanicaschema's.....	34
4.3.6	Toegepaste randvoorwaarden EEM-modellen.....	35
4.3.7	Verificatie EEM-modellen	35
4.3.8	Modellering belastingen EEM-modellen	35
4.3.9	Opleggingen.....	36
4.3.10	Netfijnheid.....	37
4.3.11	Onderbouwing EEM-modellen.....	38
5.	Resultaten.....	40
5.1	Literatuuronderzoek.....	40
5.1.1	Mate van conservatisme in de vereenvoudigde rekenmethode.....	40
5.1.2	Uitgewerkt rekenvoorbeeld voor vergelijking relatieve kipslankheid	41
5.2	Numeriek onderzoek.....	42
5.2.1	Resultaten GNA's en GMNIA's.....	42
6.	Conclusies.....	43
6.1	Beantwoording deelvraag 1.....	43
	Algemene kipprommen & de vereenvoudigde toetsingsmethode.....	43
	Kipprommen voor gewalste profielen & de vereenvoudigde toetsingsmethode.....	43
6.2	Beantwoording deelvraag 2.....	43
6.3	Beantwoording deelvraag 3.....	44
	Invloed van een normaaltrekkkracht op kipsabiliteit	44
	Implementeren axiale trekkkracht bij toetsing kipsabiliteit – methodes met kipprommen	45
	45
	Vereenvoudigde toetsingsmethode.....	46

6.4	Beantwoording hoofdvraag.....	46
7.	Discussie	47
7.1	Validiteit & betrouwbaarheid	47
7.1.1	Validiteit.....	47
7.1.2	Generaliseerbaarheid.....	47
7.1.3	Betrouwbaarheid.....	47
7.1.4	Reproduceerbaarheid	47
7.1.5	Interpretatie resultaten.....	48
7.2	Beperkingen.....	48
7.2.1	Beschouwde profielen GNA- & GMNIA-berekeningen.....	48
7.2.2	Afrondingstralen staalprofielen	48
7.2.3	Restspanningen.....	48
8.	Aanbevelingen.....	49
8.1	Vervolgonderzoek	49
	Invloed waarde axiale trekkracht	49
	Excentrische trekkracht.....	49
	Wringmomenten & torsie	49
8.2	Ontwerptabel vereenvoudigde toetsingsmethode	49
	Literatuurlijst.....	52
	Bijlages	54
	Bijlage 1: Literatuuronderzoek kipstabiliteit.....	54
	Bijlage 2: Handberekening vergelijking toetsingsmethoden kipstabiliteit.....	54
	Bijlage 3: Grafieken en tabellen vergelijking toetsingsmethoden kipstabiliteit.....	54
	Bijlage 4: Tabellen GNA & GMNIA's	54
	Bijlage 5: Grafieken GMNIA's.....	54
	Bijlage 6: Uitvoer GNA's RFEM.....	54
	Bijlage 7: Uitvoer GMNIA's RFEM.....	54
	Bijlage 8: Nomogram vereenvoudigde toetsingsmethode	54
	Bijlage 9 Grafieken invloed axiale trekkracht	54

Figurenlijst

Figuur 0 Kipinstabiliteit voorblad (Schaper et al., 2019).....	0
Figuur 1 Kipinstabiliteit (Horikx, 2019).....	12
Figuur 2 T-staal op druk (Horikx, 2019)	13
Figuur 3 Schema opzet onderzoek – (eigen werk).....	14
Figuur 4 Diverse instabiliteitsvormen (Bodén & Lundin, 2019)	16
Figuur 5 Vereenvoudiging mechanicaschema gedrukte flens (Knobloch & Kuhlmann, 2020)	17
Figuur 6 Beschouwde mechanicaschema's (eigen werk).....	18
Figuur 7 Oppervlak van de gedrukte flens voor verschillende belastingposities (Schaper et al., 2019)	21
Figuur 8 (Niet) -stabiliserende belastingen (Brown, 2016)	22
Figuur 9 Bepaling M_y (Kindmann, 2021).....	23
Figuur 10 Torsie en torsiestijfheid (Raven, 2006).....	24
Figuur 11 Factor β_c gerelateerd aan verhouding h / t_f en de relatieve kipslankheid (Schaper et al., 2019)	25
Figuur 12 Relatie torsieknik van kolommen en kip van liggers (Steenbergen et al., 2022)	26
Figuur 13 Momentwaarden (Stichting Koninklijk Nederlands Normalisatie Instituut, 2016a)	28
Figuur 14 Eerste eigenvorm (kipinstabiliteit) (eigen werk)	29
Figuur 15 Beschouwde profielen, standaard doorsnede (boven), plaatmodel in RFEM (onder) (eigen werk).....	30
Figuur 16 Globale geometrische staafimperfecties door equivalente belastingen (Bodén & Lundin, 2019).....	32
Figuur 17 Spanning-rekdiagram EEM-modellen (Stichting Koninklijk Nederlands Normalisatie Instituut, 2011)	33
Figuur 18 Rekenmodellen (Snijder et al., 2011).....	34
Figuur 19 Beschouwde mechanicaschema's (eigen werk)	34
Figuur 20 Assenstelsel (eigen werk).....	35
Figuur 21 Modelling belastingen: q-last (boven), F-last (onder) (eigen werk)	36
Figuur 22 Modelling axiale trekkracht (eigen werk).....	36
Figuur 23 Roloplegging (links) en scharnierende oplegging (rechts) (eigen werk)	37
Figuur 24 Grafiek resultaten GNA's & GMNIA's (eigen werk).....	42
Figuur 26 Grafiek gunstige axiale trekkracht - IPE vs. HEA & HEB (eigen werk).....	45
Figuur 27 Nomogram vereenvoudigde toetsingsmethode voor kipstabiliteit – vertaald (Knobloch & Kuhlmann, 2020).....	50

Tabellenlijst

Tabel 1	Overzicht profielen en verhouding hoogte/overspanning	19
Tabel 2	Controle plaatplooï door afschuiving	31
Tabel 3	Beschouwde profielen met doorsnede grootheden en imperfecties	32
Tabel 4	Uitkomsten diverse modellen basismodel.....	35
Tabel 5	Resultaten netverfijning	37
Tabel 6	Overzicht axiale trekkrachten	39
Tabel 7	Overzicht verschillen met vereenvoudigde methode volgens artikel 6.3.2.4.....	40
Tabel 8	Relatieve kipslankheid IPE270 met verschillende belastingschema's (rekenwaarde moment Med: 62,5 kNm)	41

Afkortingen en symbolen

Engelse afkortingen

GMNIA	Geometrically and materially non-linear with imperfections analysis
GNA	Geometrically nonlinear analysis
LBA	Linear bifurcation analysis
LDB	Lateral distortional buckling
LEA	Linear-elastic analysis
LTB	Lateral torsional buckling
RFEM	FEM Structural analysis software

Symbolen

α_{cr}	Kritieke elastische vergrotingsfactor
α_{LT}	Imperfectiefactor voor kipstabiliteit
A	Oppervlak
$A_{eff,f}$	Effectief oppervlak van de gedrukte flens
$A_{eff,w,c}$	Effectief oppervlak van het gedrukte deel van het lijf
C_1	Coëfficiënt afhankelijk van de aard van de belasting
C_2	Coëfficiënt afhankelijk van het aangrijpingspunt van de belasting
E	Elasticiteitsmodulus
f_y	Vloeispanning
G	Glijdingsmodulus
h	Profielhoogte
h_{eff}	Effectieve hoogte
$I_{eff,f}$	Effectief traagheidsmoment van de gedrukte flens voor de zwakke as
$I_{f,z}$	Traagheidsstaal van de equivalente gedrukte flens en 1/6e deel van het lijf
I_t	Torsietraagheidsmoment
I_y	Traagheidsmoment om de y-as
I_w	Welvingstraagheidsmoment
I_z	Traagheidsmoment om de z-as
k_c	Correctiefactor slankheid gebaseerd op het momentenverloop
kfl	Modificatiefactor ter compensatie van de conservatieve toetsingsmethode
Lkip	Ongesteunde kiplengte
Lc	Lengte tussen zijdelingse steunen
$M_{b,Rd}$	Rekenwaarde van de kipweerstand
M_{cr}	Kritiek elastisch kipmoment
$M_{y,ed}$	Rekenwaarde van het buigend moment
M_{pl}	Plastisch weerstandsmoment
N_{cr}	Kritieke elastische knikkracht
tf	Flensdikte
tw	Lijfdikte
Wel	Elastisch weerstandsmoment
Wpl	Plastisch weerstandsmoment



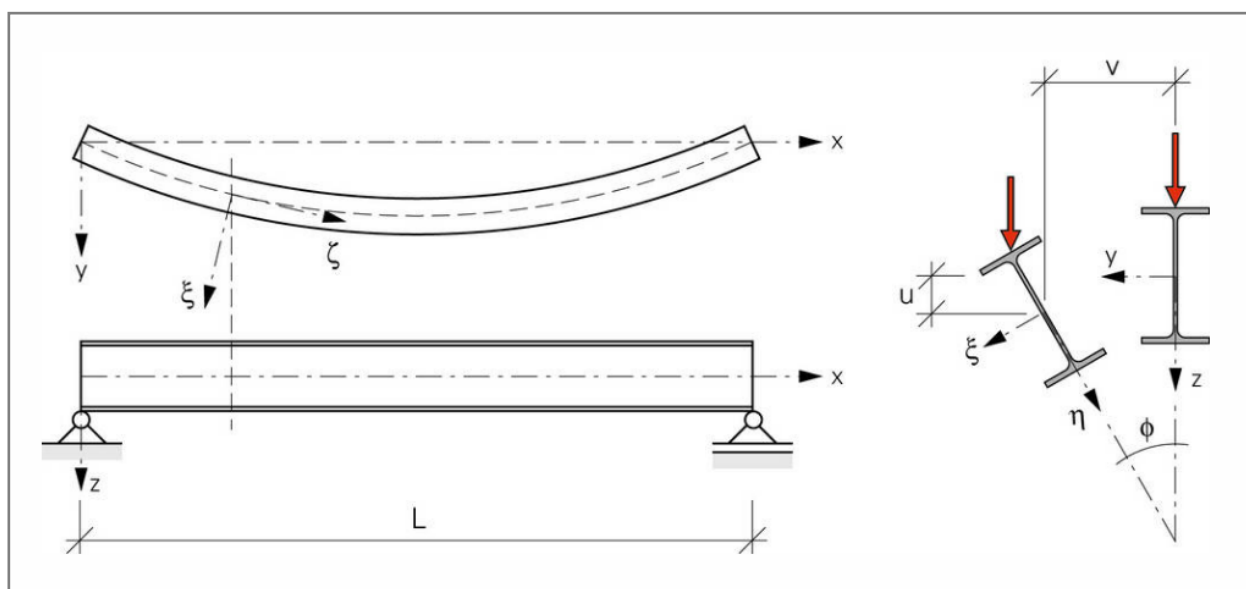
Griekse letters

α	Factor waarbij de invloed van lijfwelving in rekening wordt gebracht
β	Verhouding van het kleinste en grootste absolute moment om de y-as
λ	Slankheid
λ_1	Referentieslankheid
λ_{c0}	Relatieve slankheidslimiet
$\bar{\lambda}_{LT}$	Relatieve kipslankheid
$\bar{\lambda}_{LT,0}$	Grensslankheid kip
μ_{cr}	Kritieke elastische lastfactor
ν	Poissonfactor of dwarscontractiecoëfficiënt
σ	Spanning
σ_{cr}	Kritieke elastische kipspanning
φ_{LT}	Hulpfactor ter bepaling van reductiefactor voor kipstabiliteit
χ	Reductiefactor
χ_{LT}	Kipreductiefactor
$\chi_{LT,mod}$	Gemodificeerde kipreductiefactor

1. Inleiding

1.1 Aanleiding

Kipinstabiliteit is een bezwijkvorm van op buiging belaste liggers. Bij het optreden van kipinstabiliteit zal de ligger bezwijken. De verhouding tussen de hoogte en breedte van het profiel speelt een belangrijke rol in de kipstabiliteit van het profiel. Als kipinstabiliteit optreedt, zal de ligger in de richting van de zwakke as verplaatsen; de gedrukte flens zal hierdoor meer verplaatsen dan de getrokken flens, waardoor ook rotatie van de ligger om de lengte-as optreedt. In figuur 1 in rechts het roteren van een ligger door kipinstabiliteit weergegeven. Het toetsen van stalen profielen op kipstabiliteit is een complexe materie. Bij kipinstabiliteit treedt torsie en buiging op om zowel de y-as als de z-as. Daarnaast zal welving en wringing in de doorsnede optreden.



Figuur 1 Kipinstabiliteit (Horikx, 2019)

Voor het toetsen van staalconstructies op kipstabiliteit zijn in Eurocode 3 *NEN-EN 1993-1-1:2006+A1:2014+NB:2016 staal - Algemene regels* (Stichting Koninklijk Nederlands Normalisatie Instituut, 2016a) drie rekenmethodes omschreven:

1. 6.3.2.2 Kipkrommen – Algemeen;
2. 6.3.2.3 Kipkrommen voor gewalste profielen of equivalente gelaste profielen;
3. 6.3.2.4 Vereenvoudigde toetsingsmethoden voor gesteunde liggers in gebouwen.

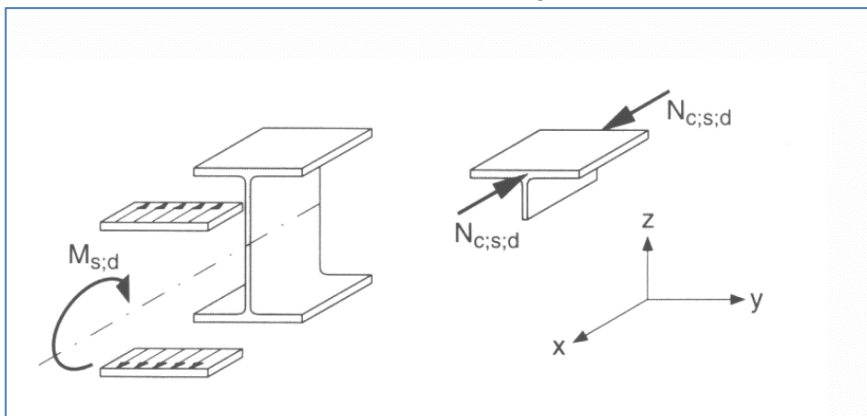
De methode volgens artikel 6.3.2.2 is een algemene methode omschreven die bruikbaar is voor alle stalen liggers. De tweede methode volgens artikel 6.3.2.3 is een specifieke methode die alleen toepasbaar is voor gewalste profielen of equivalente gelaste profielen. Conform artikel 6.3.2.4 kan de kipstabiliteit ook gecontroleerd worden met een vereenvoudigde toetsingsmethode voor gesteunde liggers in gebouwen. Deze laatste methode wijkt sterk af van de methodes met kipkrommen.

1.2 Probleemstelling

1.2.1 Vereenvoudigde toetsingsmethode & k_c -factor

De Eurocode 3 geeft meerdere mogelijkheden om de kipstabiliteit van stalen liggers te controleren. Daarbij is onderscheid te maken tussen drie methodes die gebaseerd zijn op kipkrommen en een vereenvoudigde toetsingsmethode. Het blijkt echter dat de verschillen groot zijn tussen de eerste

twee genoemde toetsingsmethoden en de vereenvoudigde methode. De vereenvoudigde methode is daarom ongunstig ten opzichte van de toetsingen volgens de kipkrommen. Dit heeft er onder andere mee te maken dat de gunstige werking van de getrokken flens, en de invloed van



Figuur 2 T-staal op druk (Horikx, 2019)

welvingsstijfheid en de torsiestijfheid verwaarloosd wordt. De vereenvoudigde methode is in beginsel unity-check, maar een slankheidstoets. Indien deze slankheidstoets niet voldoet, kan de kipweerstand van de gedrukte liggerflens bepaald worden door met deze relatieve slankheid de kipreductiefactor te bepalen met behulp van kipkrommen. Het is onduidelijk waarom de verschillen in uitkomst zo groot zijn tussen de vereenvoudigde methode en de uitgebreide methodes. Onderzocht dient te worden hoe de vereenvoudigde methode aangepast en verbeterd dient te worden, zodat een betrouwbare toetsing ontstaat die daadwerkelijk iets zegt over de capaciteit van het profiel waarbij een T-profiel op druk het uitgangspunt is.

Het verloop van de momentenlijn geeft het verloop van de drukkracht in de gedrukte flens weer. Het verloop van de drukkracht wordt in rekening gebracht met de factor k_c . De k_c -factor geeft de mogelijkheid om een toetsing op knikinstabiliteit uit te voeren met een verlopende drukkracht. In tabel 6.6 van *NEN-EN 1993-1-1:2006+A1:2014+NB:2016 staal - Algemene regels* (Stichting Koninklijk Nederlands Normalisatie Instituut, 2016a) kan deze factor worden afgelezen voor acht basisgevallen. Er zijn echter ook situaties mogelijk die niet binnen deze tabel vallen. Deze tabel is beperkt en verdient uitbreiding.

1.2.2 Effect axiale trekkracht

Over de effecten van een aanwezige axiale trekkracht op de kipstabiliteit van de ligger is weinig bekend; dit geldt voor alle drie de toetsingsmethoden voor kipstabiliteit. In de praktijk wordt vaak de normaaltrekkracht verwaarloosd en een kiptoetsing uitgevoerd zonder deze normaaltrekkracht mee te nemen. Dit wordt ook omschreven door Steenbergen et al. (2022). De mate van conservatisme door het negeren van de trekkracht wordt onderzocht, evenals de beschouwing van de trekkracht in combinatie met kipstabiliteit en de implementatie hiervan in de huidige toetsing van kipstabiliteit.

Als er alleen buiging optreedt in een ligger, zal dit bij de flenzen resulteren in respectievelijk een drukkracht en een trekkracht. Door de drukkracht wordt instabiliteit veroorzaakt. Als er een axiale trekkracht aanwezig in de ligger wordt verwacht dat deze trekkracht stabiliserend zal werken. Indien deze gunstige werking meegenomen kan worden in de toetsing zal deze toetsing dichter bij de werkelijkheid zijn. Dit zou kunnen resulteren in een lichter profiel of het toepassen van minder kipsteunen.

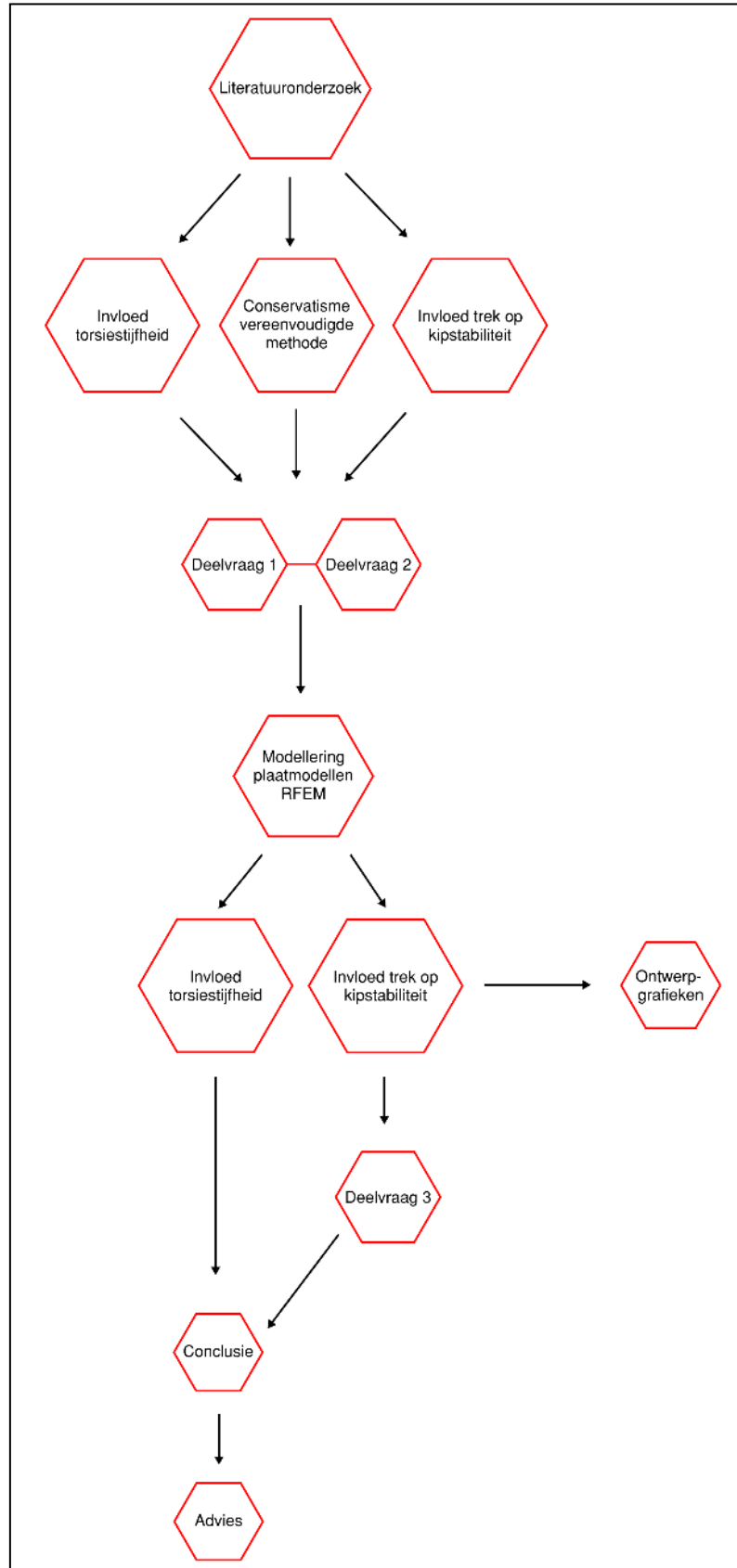
1.3 Doelstelling

Om de hierboven gedefinieerde problemen te kunnen onderzoeken en op te lossen, is voor dit onderzoek de volgende doelstelling geformuleerd:

De conservatieve vereenvoudigde toetsingsmethode voor kipstabiliteit verbeteren en toegankelijker maken voor de ontwerper en het implementeren van de gunstige werking door een axiale trekkracht.

1.4 Onderzoekopzet

De opzet en het verloop van dit onderzoek is in deze paragraaf omschreven. Achtereenvolgens worden de onderzoeksvragen, onderzoeks-structuur en de leeswijzer van dit onderzoek behandeld.



Figuur 3 Schema opzet onderzoek – (eigen werk)

1.4.1 Onderzoeksvragen

Om de doelstelling van het onderzoek te bereiken, is de volgende hoofdvraag geformuleerd:

Op welke wijze dient de conservatieve vereenvoudigde toetsingsmethode verbeterd te worden, waarbij tevens de gunstige invloed van trek is meegenomen?

Om de hoofdvraag goed te kunnen beantwoorden, zijn drie deelvragen opgesteld:

1. *Hoe conservatief is de bestaande vereenvoudigde toetsingsmethode voor kipstabiliteit en wat zijn hiervan de oorzaken?*
2. *Welke aanpassingen zijn er nodig aan de vereenvoudigde toetsingsmethode voor kipstabiliteit, zodat een praktische en betrouwbare methode ontstaat?*
3. *Wat is de invloed van een normaaltrekkracht op de kipstabiliteit en hoe kan deze in rekening worden gebracht bij het toetsen van kipstabiliteit?*

1.4.2 Onderzoekstructuur

Het schema voor de onderzoeksopzet is weergegeven in figuur 3. Als uitgangspunt wordt een literatuuronderzoek uitgevoerd bestaande uit drie onderdelen: invloed van de torsiestijfheid, mate van conservatisme van de vereenvoudigde methode en de invloed van axiale trek op de kipstabiliteit. Na het literatuuronderzoek wordt numeriek onderzoek gedaan met behulp van GNA en GMNIA's in EEM-modellen. Met deze informatie kunnen deelvraag 3 en de hoofdvraag worden beantwoord en kan een ontwerpgrafiek worden opgesteld en de bijbehorende conclusies en adviezen worden omschreven. Deelvraag 1 en 2 met betrekking tot de vereenvoudigde toetsingsmethode voor kipstabiliteit zullen in hoofdstuk 2 als onderdeel van het literatuuronderzoek worden behandeld. Deelvraag 3 met betrekking tot de gunstige werking van een axiale trekkracht zal als onderdeel van het numeriek onderzoek in hoofdstuk 3 worden onderzocht.

1.4.3 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 bevat het theoretisch kader. In hoofdstuk 3 wordt het numerieke onderzoek omschreven. De resultaten zijn in hoofdstuk 4 weergegeven. Hoofdstuk 5 omvat de conclusies van het onderzoek. Tot slot komt in hoofdstuk 6 de discussie aan bod, gevolgd door de aanbevelingen die gedaan worden in hoofdstuk 7.

2. Theoretisch kader

In dit hoofdstuk wordt het theoretisch kader van het onderzoek omschreven.

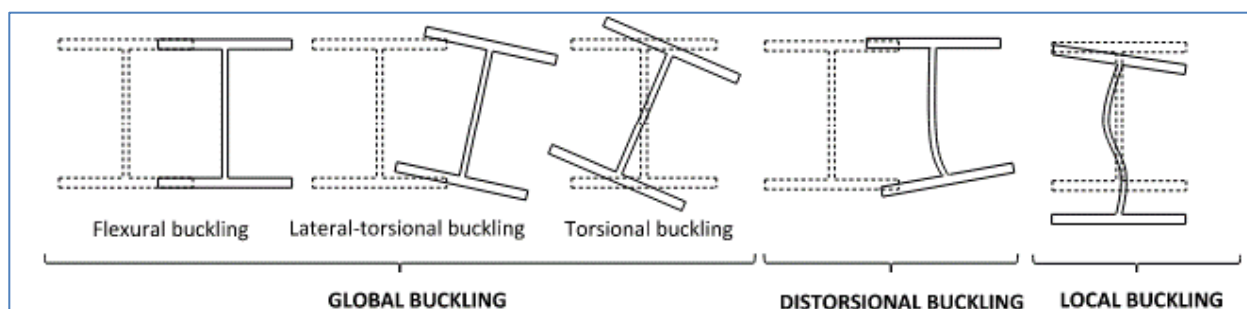
2.1 Kipinstabiliteit

De instabiliteitsvorm waar onderzoek naar gedaan wordt, is kipstabiliteit. Hierbij kan nog onderscheid gemaakt worden tussen een bezwijkvorm waarbij het lijf vervormt en dus lijfhuiging optreedt, en een bezwijkvorm waarbij het profiel in zijn geheel zijdelings verplaatst. In de Nederlandse literatuur wordt tussen deze twee bezwijkvormen geen goed onderscheid gemaakt. De eerste bezwijkvorm wordt Lateral Torsional Buckling of LTB genoemd. De tweede bezwijkvorm wordt Lateral Distorsional Buckling of LDB genoemd. In dit rapport is alleen onderzoek gedaan naar de eerste bezwijkvorm. Dit is in figuur 4 aangegeven als de tweede instabiliteitsvorm gezien vanaf links.

De vereenvoudigde toetsingsmethode voor kipstabiliteit is geldig voor profielen die als vormvast definiert zijn. Bij een vormvaste doorsnede wordt aangenomen dat de profieldoorsnede niet vervormd, afgezien van welving. Volgens *NEN-EN 1993-1-1:2006/NB:2016 staal – Nationale Bijlage* artikel D.4.2 hoeft het effect van doorsnedeversmoring niet in rekening te worden gebracht indien voldaan wordt aan één van de drie voorwaarden:

1. Het profiel is een standaard Europees walsprofiel uit de serie IPE, HEA, HEB of HEM;
2. Het profiel heeft een dubbelsymmetrische I-vormige doorsnede, en tevens grijpt de belasting niet hoger aan dan $0,1 h$ boven de bovenflens en er geldt $h/t_w \leq 75$;
3. Het profiel heeft een dubbelsymmetrische I-vormige doorsnede, terwijl de belasting niet hoger aangrijpt dan $0,1 h$ boven de bovenflens en tevens wordt voldaan aan:

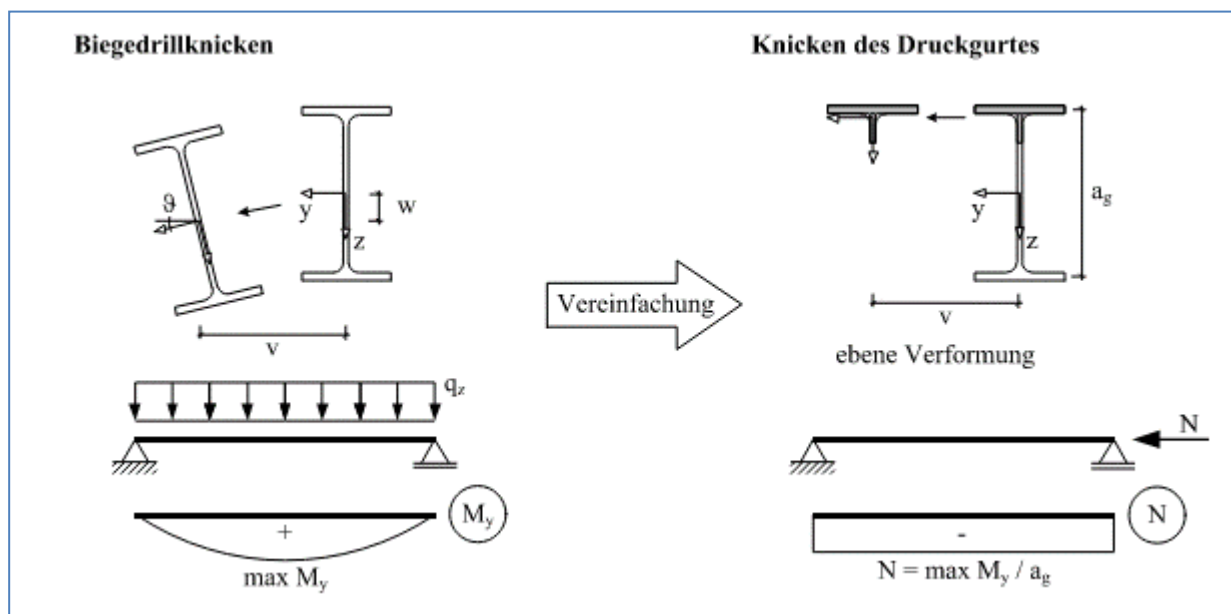
$$\alpha = \frac{ht_f 10^{12}}{t_w^3 b L_g^2} \leq 555 \quad (1)$$



Figuur 4 Diverse instabiliteitsvormen (Bodén & Lundin, 2019)

2.1 Vereenvoudigde methode voor gesteunde liggers in gebouwen – 6.3.2.4

De kipstabiliteit kan naast de kiptoetsing met algemene kipprommen of kipprommen voor gewalste profielen ook gecontroleerd worden met een vereenvoudigde methode. Deze methode bestaat uit twee stappen. Eerst wordt de grensslankheid van de gedrukte flens gecontroleerd. Het profiel wordt hierbij geschematiseerd tot een gedrukt T-profiel. Dit is weergegeven in figuur 5.



Figuur 5 Vereenvoudiging mechanischeschema gedrukte flens (Knobloch & Kuhlmann, 2020)

Indien de grensslankheid voldoet, is de ligger niet gevoelig voor kipinstabiliteit. Voldoet deze grensslankheid niet, dan dient bij de tweede stap de ligger getoetst te worden volgens artikel 6.3.2.4 (2) van *NEN-EN 1993-1-1:2006+A1:2014+NB:2016 staal - Algemene regels*. De kipreductiefactor χ_{LT} wordt dan bepaald door de slankheid van de gedrukte flens. Dit is conservatief, gezien de torsiestijfheid van het totale profiel en de gunstige werking van de getrokken flens hier niet in meegenomen zijn. Daarom geeft de vereenvoudigde toetsingsmethode een ongunstige uitslag ten opzichte van de andere rekenmethoden. In onderstaande formule is de vereenvoudigde toetsingsmethode weergegeven:

$$\lambda_f = \frac{k_c L_c}{i_{f,z} \lambda_1} \leq \lambda_{co} \frac{M_{c,rd}}{M_{y,ed}} \quad (2)$$

Waarin:

$$k_c = \text{slankheidscorrectiefactor conform tabel 6.6 NEN 1993 – 1 – 1} \quad (3)$$

$$L_c = \text{lengte tussen steunen} \quad (4)$$

$$i_{f,z} = \text{traagheidsstraal van de gedrukte flens} + 1/3 \text{ gedrukte lijfoppervlak} \quad (5)$$

$$i_{f,z} = \sqrt{\frac{I_{z,gedrukte\ flens}}{A_{gedrukte\ flens}}} = \sqrt{\frac{0,5I_z - \frac{1}{12} * \frac{2}{3} * 0,5 * h_w * t_w^3}{0,5 A - \frac{2}{3} * 0,5 * h_w * t_w}} \quad (6)$$

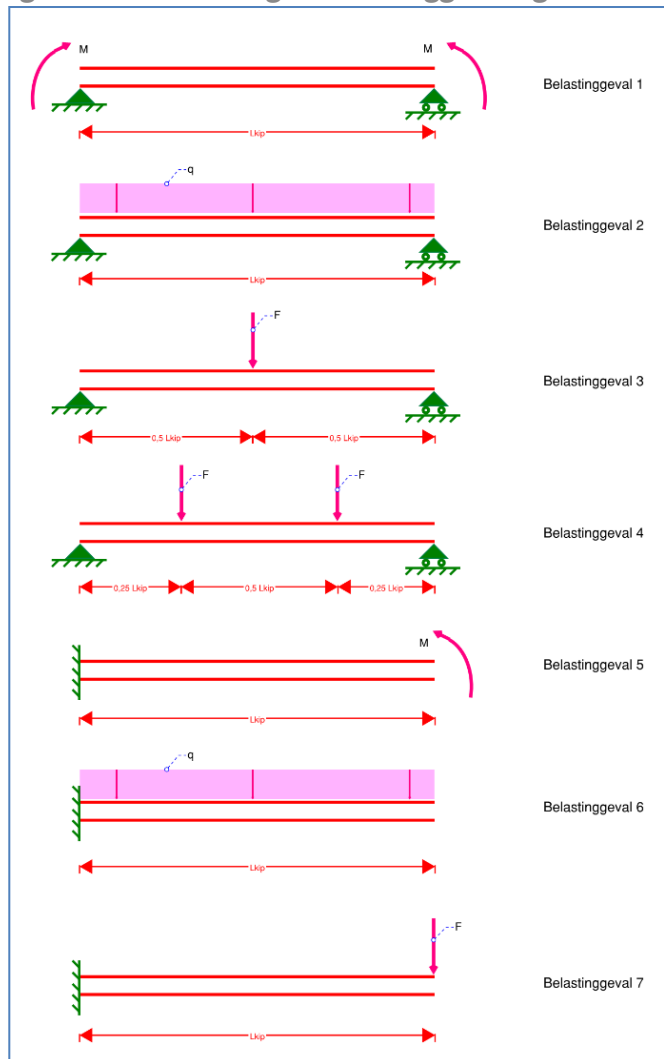
$$\lambda_1 = \text{relatieve slankheidslimiet} = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (7)$$

$$\lambda_{co} = \text{relatieve slankheidslimiet} = 0,20 \quad (8)$$

3.1.1 Mate van conservatisme vereenvoudigde methode voor gesteunde liggers in gebouwen

Om te kunnen bepalen hoe conservatief de vereenvoudigde toetsingsmethode voor gesteunde liggers in gebouwen is, zijn zeven verschillende mechanicamodellen met variërende lengte (5, 10, 15, 20 en 25m) doorberekend voor vijftien verschillende profielen. Deze zeven mechanicamodellen zijn weergegeven in figuur 6. Dit zijn de mechanicamodellen die het meest voorkomen en die in *NEN-EN 1993-1-1:2006+A1:2014+NB:2016 staal - Algemene regels* als standaardgevallen zijn omschreven waardoor deze schema's relevant zijn om te onderzoeken.

Hierbij zijn de drie methodes om de kippstabiliteit te toetsen onderzocht. Er is onderzocht hoe conservatief de vereenvoudigde methode is ten opzichte van de methodes omschreven in artikel 6.3.2.2 en 6.3.2.3. Opvallend is dat de vereenvoudigde methode bij een lage slankheid in sommige gevallen gunstiger is dan de methodes met behulp van kippkrommen. Echter, de conclusie moet wel worden getrokken dat bij een lage slankheid kipinstabiliteit niet op zal treden. Dit is hieronder in (9) omschreven. Het verwaarlozen van de kipeffecten volgens artikel 6.3.2.2. (4) van *NEN-EN 1993-1-1:2006+A1:2014+NB:2016 staal - Algemene regels*, is hierin niet meegenomen. Hiervoor is gekozen omdat bij deze controle het optredende moment bekend dient te zijn.



Figuur 6 Beschouwde mechanicschema's (eigen werk)

Dit betekent dat kipinstabiliteit verwaarloosd mag worden als de relatieve kipslankheid kleiner is dan 0,4 óf het optredende moment M_{ed} 6,25 maal zo klein is als het kritieke elastische kipmoment M_{cr} . Omdat het optredende moment sterk kan variëren, is het te uitgebreid om hierin te variëren.

$$\text{Kipinstabiliteit mag worden verwaarloosd als: } \lambda_{lt,0} \leq \lambda_{lt} = 0,4 \text{ of } \frac{M_{ed}}{M_{cr}} \leq \bar{\lambda}_{lt}^2 = 0,16 \quad (9)$$

In tabel 1 zijn de profielen weergegeven met de lengte-breedte verhouding van de beschouwde mechanicaschema's. Bij de berekening van het kritieke elastische kipmoment M_{cr} volgens *NEN-EN 1993-1-1:2006+A1:2014+NB:2016 staal - Algemene regels* artikel NB.NB.1 (2) moet de minimale verhouding L/h 5,0 zijn. Dit houdt in dat boven deze grens dat een ligger beschouwd wordt als slanke ligger, en onder deze grens sprake van een gedrongen ligger. Een gedrongen ligger dient voorkomen te worden, daarom is in dit onderzoek deze grens van $L/h \geq 5,0$ aanhouden. Kleine uitzondering daarop is het profiel HE1000M met een lengte van 5 meter. Een uitgebreide weergave met grafieken en tabellen van de verschillen tussen de vereenvoudigde methode en de methode met kipprommen is bijgevoegd als bijlage 3 Grafieken en tabellen vergelijking toetsingsmethoden kipstabiliteit.

Tabel 1 Overzicht profielen en verhouding hoogte/overspanning

Profiel	h	b	L/h [5m]	L/h [10m]	L/h [15m]	L/h [20m]	L/h [25m]
IPE600	600	220	8,33	16,67	25,0	33,33	41,67
IPE360	360	170	13,89	27,78	41,67	55,55	69,44
IPE240	240	120	20,83	41,67	62,5	83,33	104,17
HE1000M	1008	302	4,96	9,92	14,88	19,84	24,80
HE600M	620	305	8,06	16,13	24,19	32,26	40,32
HE360M	395	308	12,65	25,32	37,97	50,63	63,29
HE240M	270	248	18,52	37,04	55,55	74,07	92,59
HE1000B	1000	300	5,00	10,00	15,0	20,0	25,0
HE600B	600	300	8,33	16,67	25,0	33,33	41,67
HE360B	360	300	13,89	27,78	41,67	55,55	69,44
HE240B	240	240	20,83	41,67	62,5	83,33	104,17
HE1000A	990	300	5,05	10,10	15,15	20,20	25,25
HE600A	590	300	8,47	16,95	25,42	33,90	42,37
HE360A	350	300	14,29	28,57	42,86	57,14	71,42
HE240A	230	240	21,74	43,47	65,22	86,96	108,70

3.1.2 Relatieve kipslankheid λ_{LT}

De relatieve kipslankheid λ_{LT} kan op diverse manieren berekend worden. De bepaling van de relatieve kipslankheid kan gerelateerd worden aan het moment, de normaaldrukkracht in de gedrukte flens of de profieieigenschappen. Er is onderzocht welke methode het nauwkeurigst is en waarbij tevens gebruikt gemaakt wordt van de gedrukte flens als T-profiel in de vereenvoudigde toetsingsmethode. De methoden zijn niet onderling vergeleken, maar er is hierbij gekeken welke methode de beste weergave van de werkelijkheid. Hieronder wordt ingegaan op deze verschillende methodes. De eerste en meeste gebruikte methode om de relatieve kipslankheid te bepalen is om gebruik te maken van het kritieke elastische kipmoment M_{cr} .

Deze methode wordt ook omschreven in *NEN-EN 1993-1-1:2006+A1:2014+NB:2016 staal - Algemene regels*. De uitwerking van deze methode is hieronder weergegeven. Voor het onderzoek is uitgegaan van profielen in doorsnedeklasse 1 en 2. Profielen in doorsnedeklasse 3 en 4 zijn hierdoor uitgesloten van het onderzoek. Hiervoor is gekozen omdat bij profielen van doorsnede klasse 3 en 4 lokaal plooien eerder op zal treden dan het bereiken van de vloeigrens. Tevens dient bij een profiel uit klasse 4 het effectieve oppervlak van het profiel bepaald te worden zodat lokaal plooien wordt voorkomen.

$$\lambda_{lt} = \sqrt{\frac{W_y * f_y}{M_{cr}}}$$

$$W_y = W_{y,pl} \text{ voor profielen van doorsnedeklasse 1 en 2} \quad (10)$$

$$W_y = W_{y,el} \text{ voor profielen van doorsnedeklasse 3}$$

$$W_y = W_{y,eff} \text{ voor profielen van doorsnedeklasse 4}$$

Het kritieke elastische kipmoment wordt als volgt berekend:

$$M_{cr} = k_{red} * \frac{C}{L_{kip}} * \sqrt{E * I_z * G * I_t} \quad (11)$$

Deze manier om de relatieve kipslankheid uit te rekenen met behulp van het kritieke elastische kipmoment is nauwkeurig en goed programmeerbaar in een programma, met de uitzondering indien de factoren C_1 en C_2 bepaald moeten worden uit grafieken. Indien het kritieke elastische kipmoment met de hand berekend wordt, is deze wel bewerkelijk en foutgevoelig. De volgende methode is een zeer snelle methode om de relatieve kipslankheid te berekenen. Echter houdt deze methode geen rekening met de invloed van de lastpositie ten opzichte van het dwarskrachtcentrum.

$$\lambda_{lt} = \xi \sqrt{\frac{L * h * f_y}{b * t_f * E}} \quad (12)$$

Met:

$$\xi = 1,32 \text{ voor profielen van doorsnedeklasse 1 en 2}$$

$$\xi = 1,23 \text{ voor profielen van doorsnedeklasse 3}$$

(voor profielen in doorsnedeklasse 4 is ξ afhankelijk van de effectieve doorsnede)

Een andere manier om de relatieve kipslankheid te berekenen is omschreven in *Biegedrillknicken als Knicken des Druckgurtes konsistenter Nachweis für geschweißte Träger im Kalt und Warmzustand* (Knobloch & Kuhlmann, 2020). In dit onderzoek zijn verbetervoorstellen gedaan voor de vereenvoudigde toetsingsmethode. Eén van de voorstellen is het aanpassen van de berekeningsmethode om de relatieve kipslankheid uit te rekenen. Uit het onderzoek blijkt dat de positie van de belasting ten opzichte van het dwarskrachtcentrum van de ligger groot is. Ook blijkt dat het verwaarlozen van de torsiestijfheid van het profiel een grote invloed heeft op de relatieve kipslankheid. In het onderzoek is de aanbeveling gedaan om het in rekening te brengen oppervlak van de gedrukte flens te bepalen door de positie van de belasting.

Uit hetzelfde onderzoek blijkt dat bij belasting op de gedrukte flens, het oppervlak van de gedrukte flens en de helft van het lijfoppervlak moet worden aangehouden als gedrukt gedeelte van het profiel. Bij belasting in het dwarskrachtcentrum mag naast het oppervlak van de flens 1/6e deel van het lijfoppervlak worden meegerekend. Indien de belasting aangebracht wordt onder de getrokken flens, mag alleen het oppervlak van de gedrukte flens worden meegerekend. Dit is weergegeven in figuur 7.

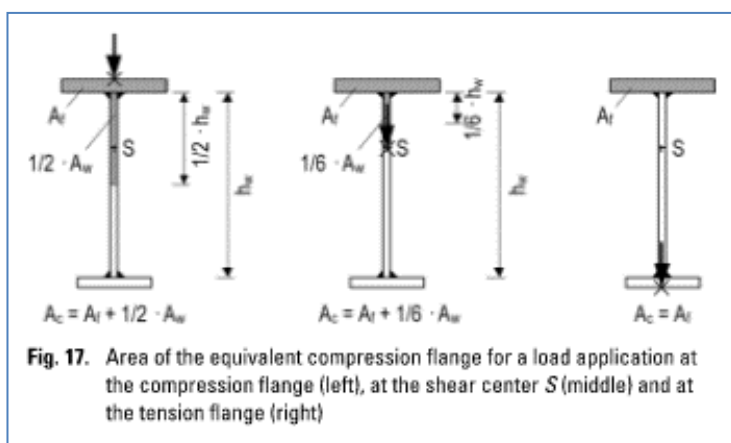


Fig. 17. Area of the equivalent compression flange for a load application at the compression flange (left), at the shear center S (middle) and at the tension flange (right)

Figuur 7 Oppervlak van de gedrukte flens voor verschillende belastingposities (Schaper et al., 2019)

$$\lambda_{lt} = \sqrt{\frac{A_c * f_y}{N_{cr,c,z}}} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} A_c &= \text{oppervlak van het gedrukte deel van de ligger} \\ A_c &= A_f + (0,5 * A_w) \text{ (belasting gepositioneerd op gedrukte flens)} \\ A_c &= A_f + (1/6 * A_w) \text{ (belasting gepositioneerd in dwarskrachtcentrum)} \\ A_c &= A_f + \text{ (belasting gepositioneerd onder getrokken flens)} \end{aligned} \quad (14)$$

$$N_{cr,c,z} = \frac{\pi^2 * E * I_{c,z}}{L_{cr}^2} = \text{kritieke elastisch knikkraft zwakke as T – stuk} \quad (15)$$

$$I_{c,z} \approx \frac{1}{12} * t_f * b^3 \quad (16)$$

De volgende methode wordt door de European Committee for Standardisation (2005) omschreven om de relatieve kipslankheid te bepalen:

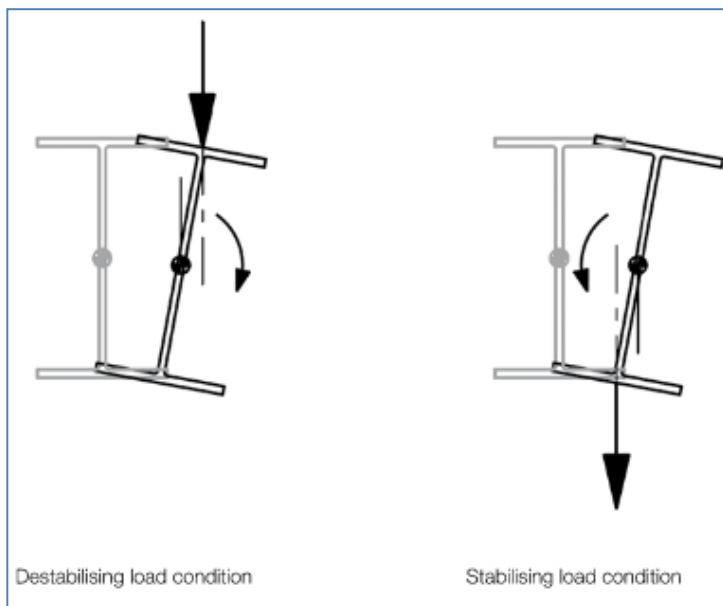
$$\lambda_{LT} = \frac{1}{\sqrt{C_1}} * 0,9 * \lambda_z * \sqrt{\beta_w} \quad (17)$$

$$\lambda_z = \frac{L_{kip}}{i_z} * \frac{1}{\lambda_1} \quad (18)$$

$$C_1 = \text{factor afhankelijk van de aard van de belasting} \quad (19)$$

$$i_z = \text{traagheidsstraal profiel} \quad (20)$$

$$\lambda_1 = 93,9 * \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \quad (21)$$



Figuur 8 (Niet)-stabiliserende belastingen (Brown, 2016)

Deze methode is relatief eenvoudig uit te voeren en vergt weinig rekenwerk. Deze methode is echter niet geschikt, omdat deze alleen gebruikt mag worden als er geen sprake is van zogenaamde 'destabilising loads'. Dit houdt in dat de methode niet gebruikt kan worden bij belasting die geplaatst wordt boven het dwarskrachtcentrum (in de richting van de gedrukte flens). Een "destabilising load" veroorzaakt een extra moment in de ligger waardoor kipingstabiliteit zal optreden. Geconcludeerd wordt dat deze methode niet gewenst is, aangezien niet alle belastingen hiermee berekend kunnen worden.

Een andere methode om het kritieke elastische kiplmoment te bepalen is omschreven door Kindmann (2021). Het gaat hier om een methode die bijna gelijk is aan de methode die wordt omschreven in *NEN-EN 1993-1-1:2006+A1:2014+NB:2016 staal - Algemene regels*. In deze methode wordt het kritieke elastische kiplmoment bepaald gerelateerd aan het basisgeval. Het kritieke elastische kiplmoment M_{cr} wordt berekend door het maximaal optredende moment M_y te delen door het moment M_{y0} van een basisgeval.

Als deze verhouding berekend is, wordt deze waarde vermenigvuldigd met het kritieke elastische kippmoment $M_{cr,y0}$ van de ligger. Dit is in onderstaande formules weergegeven, tevens is dit grafisch weergegeven in figuur 9.

$$M_{cr} = M_{cr,y0} * \frac{|\max M_y|}{M_{y0}} \quad (22)$$

$$M_{y0} = \frac{q_z * l^2}{8} = (\text{in het geval van een } q - \text{last}) \quad (23)$$

$$M_{cr,y0} = \zeta_0 * N_{cr,z} * \left(\sqrt{c^2 + (\zeta_0 * 0,4 * z_p)^2} + \zeta_0 * 0,4 * z_p \right) * 0,01 \quad (24)$$

$z =$ afstand aangrijpingspunt belasting t.o.v. dwarskrachtcentrum
 $z_p < 0$ wanneer belasting aangrijpt boven dwarskrachtcentrum
 $z_p = 0$ wanneer belasting aangrijpt in dwarskrachtcentrum
 $z_p > 0$ wanneer belasting aangrijpt onder dwarskrachtcentrum

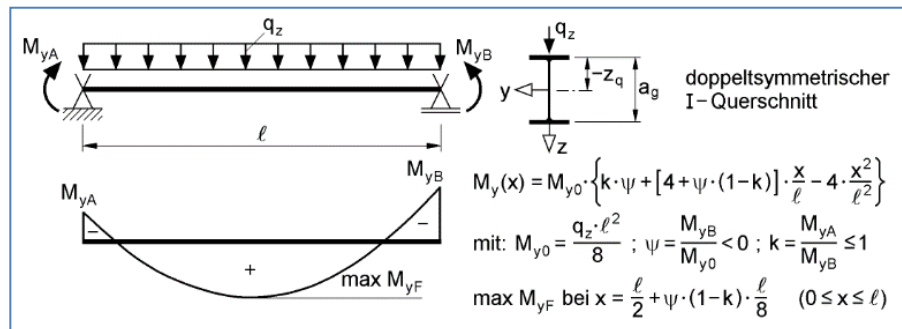
(25)

$$\zeta_0 = C_1 = \text{factor afhankelijk van de aard van de belasting} \quad (26)$$

$$N_{cr,c,z} = \frac{\pi^2 * E * I_z}{L_{cr}^2} = \text{kritieke elastische knikkraft zwakke as} \quad (27)$$

$$c = \sqrt{\frac{I_w + 0,039 * l^2 * I_{T,ges}}{I_z}} = \text{invloed torsiestijfheid profiel} \quad (28)$$

Bovengenoemde methoden om de relatieve kipslankheid te bepalen zijn onderzocht door deze slankheden te berekenen voor diverse mechanica-schema's. Het doel hiervan is om tot betere bepaling van de relatieve



Figuur 9 Bepaling M_y (Kindmann, 2021)

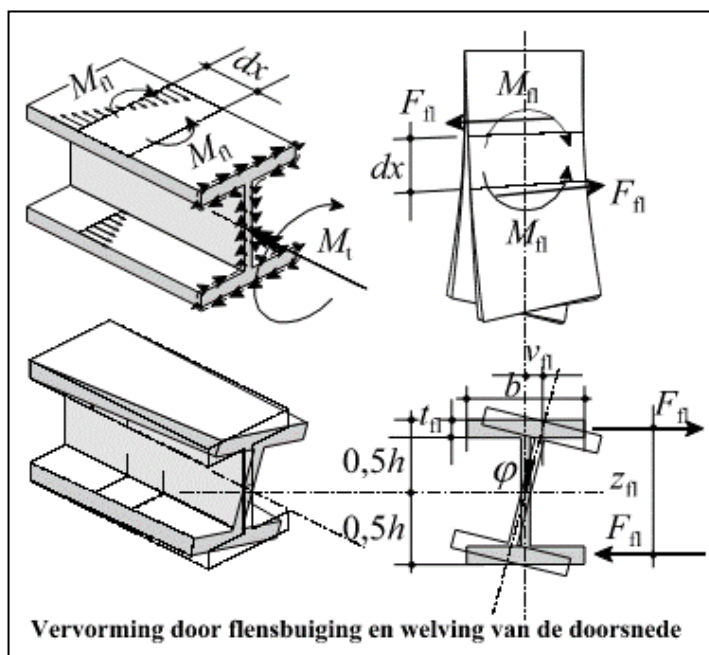
kipslankheid te komen voor de vereenvoudigde toetsingsmethode. De vereenvoudigde toetsingsmethode is zoals omschreven een snelle en simpele manier om een ligger te controleren op kpinstabiliteit, echter is de invloed van de lastpositie en de torsiestijfheid in de bestaande vereenvoudigde toetsingsmethode niet meegenomen. Dit heeft invloed op de relatieve kipslankheid.

Er is dus onderzocht hoe de bepaling van de relatieve kipslankheid kan worden uitgevoerd, waarbij de invloed van de lastpositie en de torsiestijfheid meegenomen is, en waarbij de vereenvoudigde toetsingsmethode nog steeds snel en simpel uitvoerbaar is. De resultaten hiervan zijn omschreven in hoofdstuk 4. De berekeningen van deze methodes zijn als bijlage 1 Literatuuronderzoek bijgevoegd bij dit rapport.

3.2 Torsiestijfheid

In Duitsland is recent het onderzoek *Biegedrillknicken als Knicken des Druckgurtes konsistenter Nachweis für geschweißte Träger im Kalt und Warmzustand* (Knobloch & Kuhlmann, 2020) uitgevoerd, waarin is onderzocht hoe de vereenvoudigde rekenmethode geoptimaliseerd kan worden zodat deze minder conservatief wordt.

Door het uitvoeren van proeven en experimenten tijdens dit onderzoek, is de invloed van de torsiestijfheid beschouwd. Om de invloed van de torsiestijfheid op de kipslankheid mee te nemen in de vereenvoudigde toetsingsmethode is een extra factor bepaald. Deze modificatiefactor β_c brengt de verhoudingen tussen de flensdikte en profielhoogte en daarmee het effect van de torsiestijfheid in rekening. In figuur 10 is te zien dat de torsiestijfheid van een I-profiel grotendeels wordt geleverd door de flensen die het torsiemoment in de vorm van krachten opnemen.



Figuur 10 Torsie en torsiestijfheid (Raven, 2006)

Bij de kiptoetsing van profielen wordt gebruik gemaakt van kipprommen. Deze kipprommen zijn opgesteld na een groot aantal proeven. In deze kipprommen wordt de kipreductiefactor onder meer bepaald door effecten die fysisch en geometrisch niet-lineair gedrag veroorzaken. De oorzaken van deze effecten zijn bijvoorbeeld restspanningen in het profiel, maatafwijkingen van de doorsnede en de onvolkomenheid van het materiaal.

In *NEN-EN 1993-1-1:2006+A1:2014+NB:2016 staal - Algemene regels* worden vijf verschillende kipprommen onderscheiden. De keuze voor een kippromme is afhankelijk van het profiel, de productiemethode, en de staalsoort. Voor gelaste profielen dient bij de vereenvoudigde toetsingsmethode gebruikt gemaakt te worden van kippromme d. In de vereenvoudigde methode is voor gewalste profielen kippromme c van de kipprommen voorgeschreven.

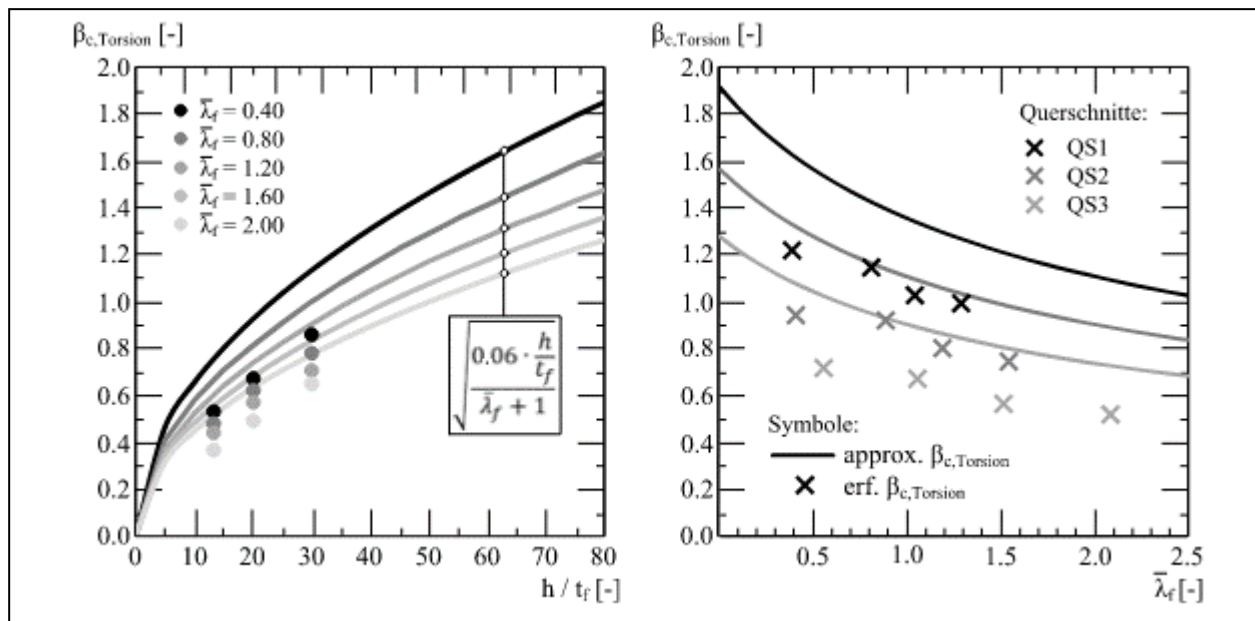
$$M_{b,Rd} = \chi_{c,z} * W_y * \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (29)$$

$$\bar{\lambda}_{c,z} = \sqrt{\frac{A_c * f_y}{N_{cr,c,z}}} \quad (30)$$

$$\bar{\lambda}_{c,z,mod} = k_c * \beta_c * \bar{\lambda}_{c,z} \quad (31)$$

$$\beta_c = \sqrt{\frac{0,06 * \frac{h}{t_f}}{\bar{\lambda}_{c,z} + 1,0}} \text{ maar } \beta_c \leq 2,0 \quad (32)$$

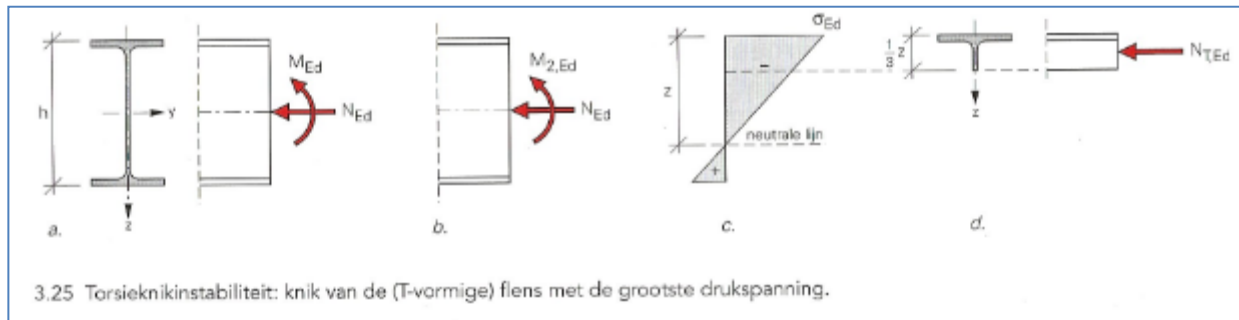
De factor β_c brengt de invloed van de torsiestijfheid van het profiel in rekening. Door de verhouding tussen de hoogte van het profiel en dikte van de liggerflens te vermenigvuldigen met 0,06 wordt de bovenste waarde in de breuk verkregen. De factor 0,06 is als referentiewaarde genomen en geeft de verhouding van $h/t_f = 16,6 / 1,0 = 0,06$. Als deze waarde gedeeld wordt door de relatieve kipslankheid $\bar{\lambda}_{c,z} + 1$, wordt een exponentiële functie in de vorm van een wortel gevonden. Omdat de torsiestijfheid van een ligger grotendeels bepaald wordt door de flensdikte en de hoogte van de ligger heeft een profiel met dikkere flenzen en een gelijke hoogte een grotere torsiestijfheid. In onderstaande figuur is de invloed van de factor β_c in verhouding tot de relatieve kipslankheid weergegeven.



Figuur 11 Factor β_c gerelateerd aan verhouding h/t_f en de relatieve kipslankheid (Schaper et al., 2019)

3-3 Trekkracht in combinatie met kipstabiliteit

Volgens *Stabiliteit*, (2022) is er een nauwe relatie tussen torsie-knikinstabiliteit van kolommen en kipinstabiliteit van liggers. Bij torsie-knikinstabiliteit treedt door de combinatie van druk en buiging torsie op door knikinstabiliteit. Hierbij zal de gedrukte flens zijdelings verplaatsen in de richting van de zwakke as. Bij liggers wordt deze instabiliteitsvorm omschreven als kipinstabiliteit. Dit is grafisch weergegeven in onderstaande figuur, waarin de gedrukte flens met de grootste drukspanning overeenkomt met het T-profiel van de vereenvoudigde toetsingsmethode voor kipstabiliteit.



Figuur 12 Relatie torsieknik van kolommen en kip van liggers (Steenbergen et al., 2022)

Indien de gedrukte flens zijdelings verplaatst, zal torsie en welving in de doorsnede optreden. De weerstand tegen torsieknik-instabiliteit wordt geleverd door de buigstijfheid van de gedrukte flens en de torsiestijfheid van het gehele profiel. Om de invloed van de aanwezige trekkracht te berekenen dient dit in de toetsingsmethode te worden geïmplementeerd. Er wordt onderzocht of het mogelijk is met bovenstaande gegevens een axiale trekkracht te implementeren in de bestaande rekenmethodes.

Invloed axiale trekkracht - toetsingsmethoden met kipprommen

Het toetsen van een kolom op torsieknik-instabiliteit volgt evenals de toetsing van knikstabiliteit een vaste structuur. Door Trahair (1993) en in *I-Steel beams under tension: Lateral torsional buckling, behaviour and design* (Tomás, et al., 2013) is reeds een wiskundige benadering omschreven om de invloed van axiale trek mee te nemen in de berekening van de kipstabiliteit van een ligger.

De kritiek elastische knikkracht $P_{cr,z}$ en de kritieke elastische torsieknikkracht $P_{cr,\phi}$ worden hierbij afgeleid van het kritieke elastische kippmoment M_{cr} . Als de reciproque van de originele formule wordt genoteerd kan de invloed van een axiale trekkracht in rekening worden gebracht bij de bepaling van het kritieke elastische kippmoment M_{cr} .

$$(P_{cr,z} + N_t)(P_{cr,\phi} + N_t)r_0^2 - M^2 = 0 \quad (33)$$

$$M_{cr}(0) = r_0 \sqrt{P_{cr,z} * P_{cr,\phi}} = \frac{\pi}{L} * \sqrt{EI_z GI_t} * \sqrt{1 + \frac{\pi^2 EI_w}{L^2 GI_t}} \quad (34)$$

$$\left(1 + \frac{N_t}{P_{cr,z}}\right) \left(1 + \frac{N_t}{P_{cr,\phi}}\right) = \frac{M^2}{[M_{cr}(0)]^2} \quad (35)$$

$$M_{cr}(N_t) = \sqrt{\left(1 + \frac{N_t}{P_{cr,z}}\right) \left(1 + \frac{N_t}{P_{cr,\phi}}\right)} M_{cr}(0) = \text{axiale trekkracht} \quad (36)$$

$$M_{cr}(N_c) = \sqrt{\left(1 - \frac{N_c}{P_{cr,z}}\right) \left(1 - \frac{N_c}{P_{cr,\phi}}\right)} M_{cr}(0) = \text{axiale drukkracht} \quad (37)$$

$$P_{cr,\phi} = \left(\frac{\pi^2 * E * I_w}{L^2} + G * I_t\right) \frac{1}{r_0^2} = \text{kritieke elastische torsiekracht} \quad (38)$$

$$P_{cr,z} = \frac{\pi^2 * E * I_z}{L^2} = \text{kritieke elastische knikkracht zwakke as} \quad (39)$$

Invloed axiale trekkracht - vereenvoudigde toetsingsmethode

In principe kan de methode gevolgd worden die gebruikt is bij het kritieke elastische kippmoment. Hierbij wordt dan in de vereenvoudigde methode het kritieke elastische kippmoment vervangen door de kritieke elastische knikkracht van het T-stuk in de zwakke richting. De vergrotingsfactor voor de invloed van de axiale trekkracht is dan wel gebaseerd op de torsiestijfheid van de totale profieldoorsnede. Dit is in onderstaande formules weergegeven:

$$N_{cr,c,z}(N_{ed}) = \sqrt{\left(1 - \frac{N_{ed}}{P_{e,z}}\right) \left(1 - \frac{N_{ed}}{P_{e,t}}\right)} N_{cr,c,z}(0) \quad (40)$$

$$N_{cr,c,z}(N_c) = \sqrt{\left(1 - \frac{N_c}{P_{cr,z}}\right) \left(1 - \frac{N_c}{P_{cr,\phi}}\right)} N_{cr,c,z}(0) = \text{axiale drukkracht} \quad (41)$$

$$N_{cr,c,z}(N_t) = \sqrt{\left(1 + \frac{N_t}{P_{cr,z}}\right) \left(1 + \frac{N_t}{P_{cr,\phi}}\right)} N_{cr,c,z}(0) = \text{axiale trekkracht} \quad (42)$$

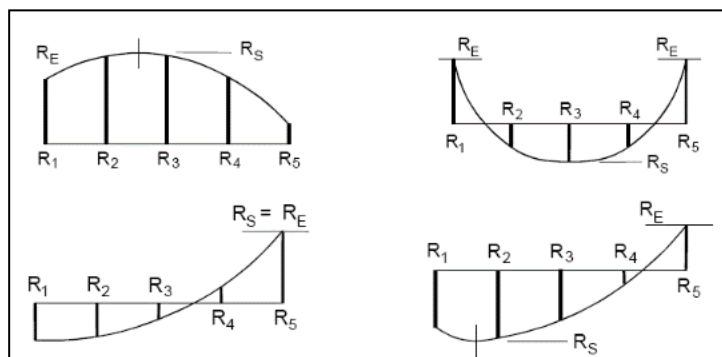
3.4 k_c -factor

De k_c -factor brengt het verloop van de momentenlijn in rekening. In tabel 6.6 van *NEN-EN 1993-1-1:2006+A1:2014+NB:2016 staal - Algemene regels* (Stichting Koninklijk Nederlands Normalisatie Instituut, 2016a) zijn deze weergegeven. Aangezien er in de praktijk veel meer variaties zijn voor momentenlijnen, is tabel 6.6 nogal beperkt. Omdat de k_c -factor afhankelijk is van het verloop van de momentenlijn, kan de k_c -factor volgens onderstaande formule, omschreven in *Lateral torsional buckling and slenderness* (Brettle, 2006) bepaald worden met behulp van de coëfficiënt C_1 .

$$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_1}} \quad (43)$$

Het verdient de aandacht om de factor k_c nauwkeurig te bepalen. Deze factor is afhankelijk van de coëfficiënt C_1 . Deze coëfficiënt heeft betrekking op het verloop van de momentenlijn in de ligger. Bij een niet-lineair verlopende momentenlijn kan gebruik gemaakt worden van de methode die is omschreven in bijlage BB Instabiliteit van onderdelen van constructies van gebouwen, paragraaf BB.3.3.2 Niet-lineair momentenverloop van Eurocode 3. Hierin is R_E de grootste waarde van R_1 of R_5 (moment ter plaatse van staafeinden) en is R_S de maximumwaarde van R over de gehele lengte. De waarden voor R_2 , R_3 en R_4 zijn de momenten op respectievelijk 25%, 50% en 75% van de liggerlengte.

$$C_n = \frac{12}{[R_1 + 3R_2 + 4R_3 + 3R_4 + R_5 + 2(R_S - R_E)]} \quad (44)$$



Figuur 13 Momentwaarden (Stichting Koninklijk Nederlands Normalisatie Instituut, 2016a)

Uitgebreide berekeningen uit hoofdstuk 2 zijn als bijlage 1 Literatuuronderzoek bijgevoegd.

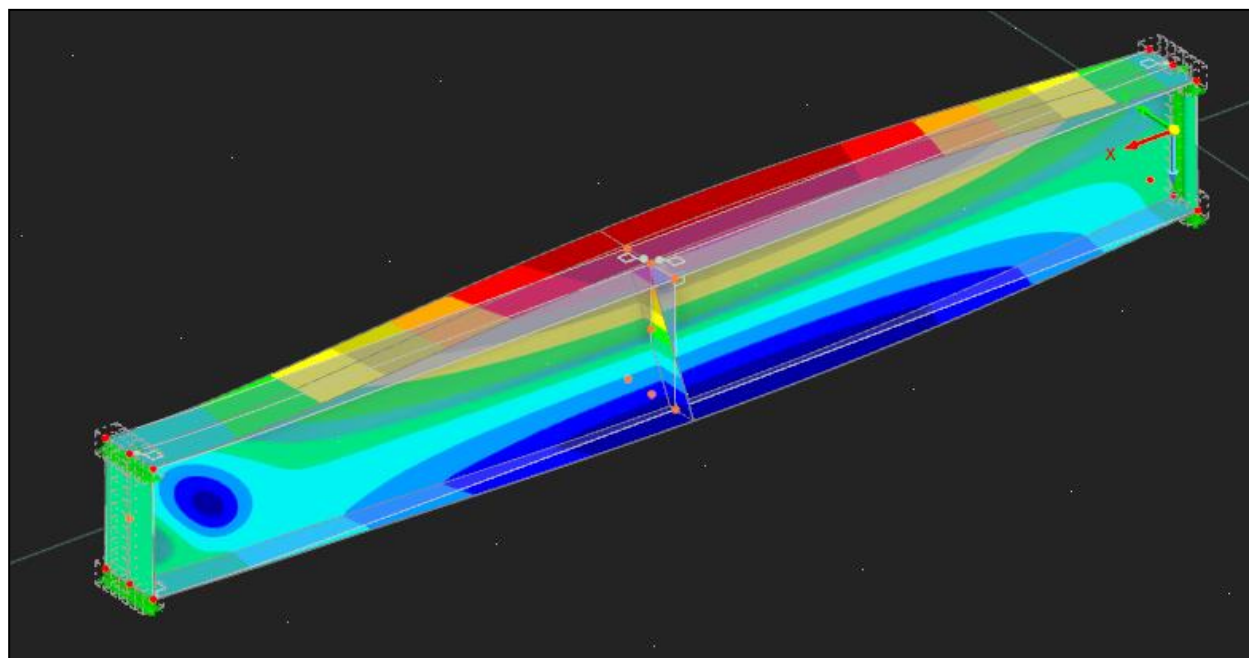
4. Numeriek onderzoek

4.1 Aanleiding en doel

Om de invloed van een axiale trekkracht op de kipstabiliteit te onderzoeken is literatuuronderzoek gedaan. Hieruit blijkt dat een axiale trekkracht een gunstig effect heeft op de kipstabiliteit. Om inzicht te verkrijgen in de werking van deze axiale trekkracht is naast literatuuronderzoek ook numeriek onderzoek gedaan. Het doel van dit numeriek onderzoek is om de gunstige werking van een axiale trekkracht te implementeren in de toetsing op kipstabiliteit. Door numeriek onderzoek uit te voeren is inzicht verkregen hoe gunstig deze axiale trekkracht werkt per mechanicaschema en profiel.

4.2 Aanpak

Om het gewenste resultaat te verkrijgen, zijn diverse analyses uitgevoerd. Om de uitbuigingsvorm door kipinstabiliteit te verkrijgen uit het rekenmodel is eerst een lineair-elastische bifurcatie analyse (LBA) uitgevoerd. Vervolgens is met een geometrisch en fysisch niet-lineaire analyse met imperfecties (GMNIA) de daadwerkelijke bezwijkbelasting bepaald die nodig is de kipreductiefactor χ_{LT} te bepalen. Als laatste onderdeel van het numeriek onderzoek- zijn geometrisch niet-lineaire analyses (GNA) uitgevoerd. Met deze analyses kan het kritieke elastisch kipmoment M_{cr} bepaald worden. Door GMNIA's en GNA's uit te voeren, is zowel aan de begin en aan het einde van de kiptoetsing het effect van een axiale trekkracht beschouwd. Door deze analyses met elkaar te vergelijken wordt het effect van fysisch niet-lineair rekenen en de imperfecties zichtbaar.



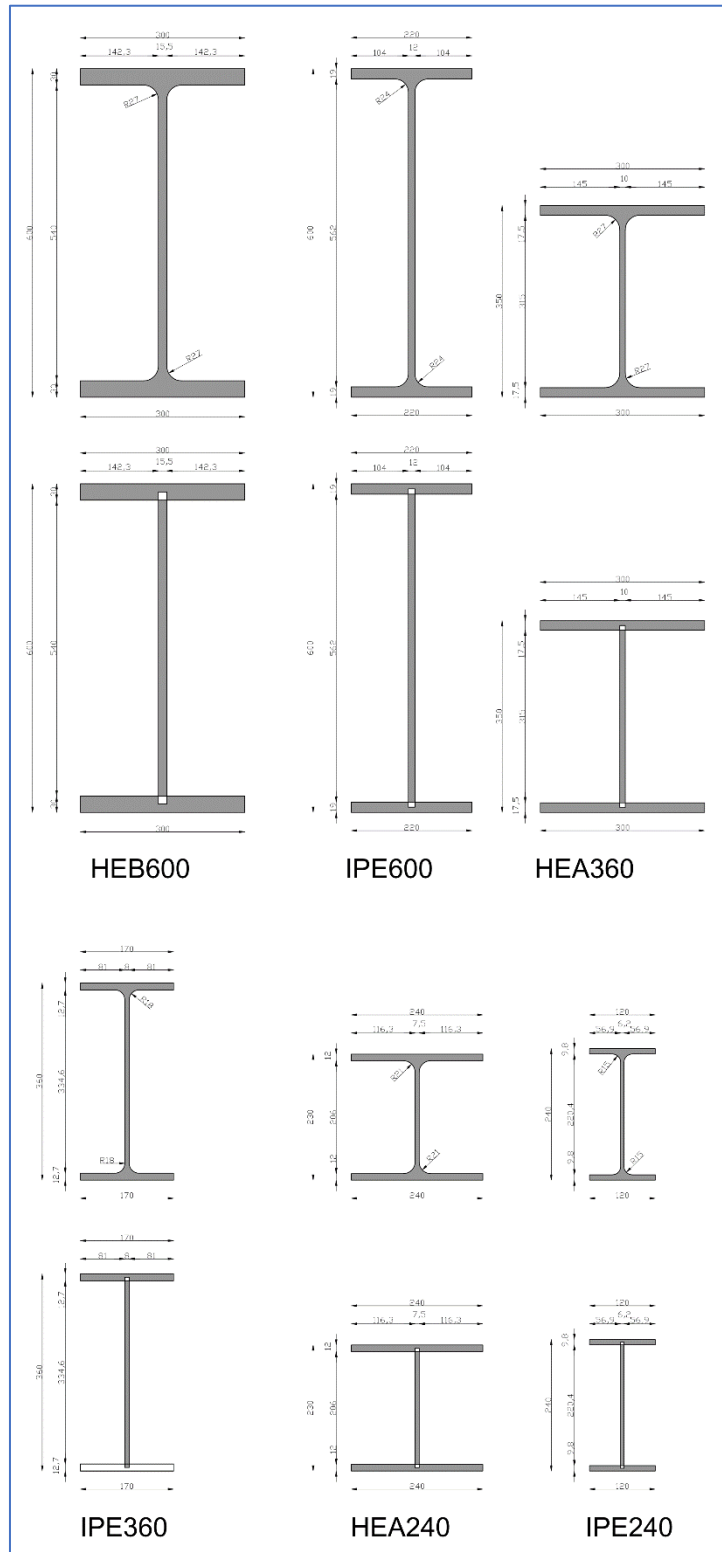
Figuur 14 Eerste eigenvorm (kipinstabiliteit) (eigen werk)

4.3 Modelleren plaatmodellen in RFEM

4.3.1 Liggermodellen

Om de structuur goed te modelleren, is gebruikgemaakt van plaatmodellen. Er is gekozen om zes verschillende profielen toe te passen, waarbij gevarieerd is in hoogte en profieltype. Als profielen zijn gekozen: HEB600, IPE600, HEA360, IPE360, HEA240 en IPE240. Er is gekozen om steeds twee profielen te kiezen met dezelfde hoogte en verschillende flensdikte en flensbreedtes. Uit het literatuuronderzoek is gebleken dat de torsiestijfheid van een ligger grotendeels beïnvloedt wordt door de verhouding h / t_f . Eveneens blijkt dat axiale trekspanningen in de doorsnede zorgen voor een grotere torsiestijfheid van de ligger. Dit wordt het Wagner-effect genoemd. Door deze profielen te kiezen kan de invloed van de torsiestijfheid bij de analyses inzichtelijk worden gemaakt. De flenzen en het lijf worden als platen gemodelleerd. Dit is weergegeven in onderstaand figuur.

Voor de krachtsinleiding zijn centrisch boven de oplegging schotjes gemodelleerd. Deze schotten worden over de gehele hoogte voorzien, waardoor goede krachtsinleiding kan plaatsvinden. Tevens wordt door het toevoegen van een schot een gaffeloplegging gecreëerd. Een plooi-schot kan een bi-moment veroorzaken in de ligger (Jeurdink, et al., 2022).



Figuur 15 Beschouwde profielen, standaard doorsnede (boven), plaatmodel in RFEM (onder) (eigen werk)

Gezien deze schotjes plaatplooï door afschuiving niet voorkomen, zijn alle profielen getoetst aan paragraaf 5.1 (1) van *NEN-EN 1993-1-5:2006+A1:2017+NB:2011 staal – Constructieve plaatvelden* (Stichting Koninklijk Nederlands Normalisatie Instituut, 2016a). In dit artikel wordt criteria genoemd waaraan de plaatvelden dienen te voldoen, waarna de regels voor plaatplooï door afschuiving toegepast mogen worden:

- a) De plaatvelden zijn rechthoekig binnen de in artikel 2.3 vermelde grenzen voor de helling:
 Artikel 2.3 Effecten van plooiën van platen op prismatische elementen
1. De plaatvelden zijn rechthoekig en de flenzen zijn evenwijdig;
 2. De diameter van een niet-verstijfd gat of uitsparing is niet groter dan 0,05 b, waarin b de breedte van het plaatveld is.
- b) Eventuele verstijvingen zijn geplaatst in de lang- of dwarsrichting of in beide richtingen;
- c) Alle gaten en uitsnijdingen zijn klein;
- d) Staven hebben een prismatische dwarsdoorsnede.

De opleggingen voldoen aan deze gestelde eisen. Echter omschrijft artikel (2) van paragraaf 5.1 dat de weerstand tegen plooiën door afschuiving getoetst moet worden indien:

$$\frac{h_w}{t} \geq \frac{31}{\eta} \varepsilon \sqrt{k_\tau} \quad (\text{voor verstijfde lijfplaten}) \quad (45)$$

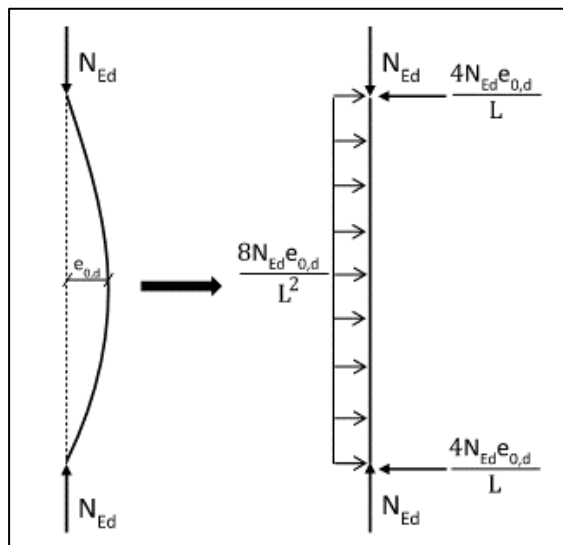
Dit is in onderstaande tabel getoetst. Als plooiëfficiënt k_τ is een waarde van 4,0 aangehouden gezien er geen langsverstijvers aanwezig zijn maar alleen dwarsverstijvers conform Bijlage A paragraaf A.3 Plooiëfficiënt bij afschuiving (1) van *NEN-EN 1993-1-5:2006+A1:2017+NB:2011 staal – Constructieve plaatvelden*. Uit onderstaande tabel blijkt dat de profielen voldoen, waardoor geen extra controle op plooi door afschuiving benodigd is. Door de schotten wordt een bi-moment veroorzaakt door verhinderde verplaatsing. Dit moment is gelijk aan het torsiemoment in de flenzen dat veroorzaakt wordt door verhinderde welving die vermenigvuldigd wordt met de hart-op-hartafstand van de flenzen (Staalsupport, z.d.). Omdat in dit onderzoek de stabiliteit van ligger wordt gecontroleerd en het toetsen van de sterkte en detaillering niet binnen de scope valt, wordt dit bi-moment genegeerd.

Tabel 2 Controle plaatplooï door afschuiving

	h	t _f	h _w	ε	η	k _τ	h _w / t	$\frac{31}{\eta} \varepsilon \sqrt{k_\tau}$
HEB600	600	30	540	1,0	1,2	4,0	18	51,7
IPE600	600	19	562	1,0	1,2	4,0	30	51,7
HEA360	350	17,5	315	1,0	1,2	4,0	18	51,7
IPE360	360	12,7	334,6	1,0	1,2	4,0	26	51,7
HEA240	230	12	206	1,0	1,2	4,0	17	51,7
IPE240	240	9,8	220,4	1,0	1,2	4,0	22,5	51,7

4.3.2 Imperfecties - GMNIA

Volgens tabel 5.1 van artikel 5.3.2 (4) uit Eurocode 3-1-1 dienen initiële lokale vooruitbuigingen aangebracht te worden. In paragraaf 5.3.4 (3) van deze norm wordt omschreven dat bij een tweede orde-berekening de imperfecties met 50% verlaagd mogen worden. Voorwaarde voor deze reductie is dat deze imperfecties beschouwd worden bij de controle op kipstabiliteit, waarbij e_0 de equivalente initiële vooruitbuiging om de zwakke as van het beschouwde profiel. Als uitgangspunt voor de imperfecties is paragraaf 6.3.2.2 Algemene kipprommen gehanteerd. Als equivalente geometrische imperfecties worden algemene staafimperfecties toegepast. Tevens wordt in bijlage C van Eurocode 3-1-5 geadviseerd welke imperfecties toegepast dienen te worden. In onderstaand overzicht is omschreven welke imperfecties toegepast zijn. Deze algemene geometrisch staafimperfecties zijn als volgt berekend:



Figuur 16 Globale geometrische staafimperfecties door equivalente belastingen (Bodén & Lundin, 2019)

$$v_{0m} = k * e_{0,d} * \begin{pmatrix} \frac{h}{b} \leq 2,0 = \frac{1}{300} \\ \frac{h}{b} > 2,0 = \frac{1}{250} \end{pmatrix} * L \quad (46)$$

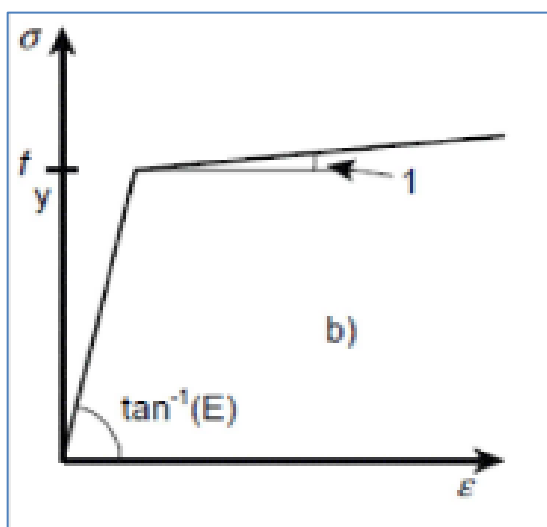
Tabel 3 Beschouwde profielen met doorsnede grootheden en imperfecties

	h/b	Kromme (art. 6.3.2.2)	$e_{0,d}$ (* L)	v_{0m} (mm) 5 meter	v_{0m} (mm) 10 meter	A [mm ²]	$W_{pl,y}$ [10 ³ mm ³]	I_z [10 ⁴ mm ⁴]	I_T [10 ⁴ mm ⁴]	I_w [10 ³ mm ⁶]
HEB600	2,00	A	1/300	8,33	16,67	27000	6420	13530	669	10965
IPE600	2,72	B	1/250	10	20	15600	3512	3387	165	2846
HEA360	1,17	A	1/300	8,33	16,67	14280	2088	7887	148,8	2177
IPE360	2,11	B	1/250	10	20	7270	1019	1043	37,3	314
HEA240	0,96	A	1/300	8,33	16,67	7680	745	2769	41,55	329
IPE240	2,00	A	1/300	8,33	16,67	3911	367	284	12,9	37,4

De imperfecties zijn gemodelleerd door equivalente belastingen op de staven aan te brengen, waardoor de gewenste vooruitbuiging in het midden van de overspanning ontstaat. Dit is in figuur 16 weergegeven. Aangehouden imperfecties behorend bij de kipprommen zijn hierboven samengevat in tabel 3. Er is voor één globale imperfectie per ligger gekozen om een wirwar aan imperfecties aan te brengen. In het model is aangegeven dat deze globale imperfectie aangrijpt de knoop die het meest verplaatst. Dit zal in veel gevallen een knoop in het midden zijn. Deze imperfectie kan aangrijpen in alle richtingen waardoor dit als een globale staafimperfectie kan worden gezien.

4.3.3 Rekenmodellen

In alle rekenmodellen in *RFEM 6 / FEM structural analysis software* (Dlubal Software, z.d.) is gebruikgemaakt van bezwijkmodellen volgens de Newton-Raphson methode. Deze methode maakt



Figuur 17 Spanning-rekdiagram EEM-modellen (Stichting Koninklijk Nederlands Normalisatie Instituut, 2011)

bij elke iteratie een nieuwe stijfheidsmatrix. De LBA's zijn uitgevoerd een lineair elastisch rekenmodel. De GMNIA's zijn uitgevoerd met een plastisch materiaalmodel gebaseerd op de bezwijkhypothese van von Mises in combinatie met een fysisch niet-lineair rekenmodel met imperfecties.

De GNA's zijn uitgevoerd met een lineair elastisch materiaalmodel gebaseerd op de bezwijkhypothese van von Mises in combinatie met een fysisch niet-lineair rekenmodel. Een grafische weergave van het materiaalgedrag bij de GMNIA's is weergegeven in figuur 15. Dit is een spanning-rekverloop waarbij uitgegaan wordt van een elastisch-plastisch model met een nominaal hellend vloeiplateau. Dit is grafisch

omschreven in figuur 14. Voor een lineair elastisch isotroop materiaal is gebruikgemaakt van de glijdingsmodulus G en de elasticiteitsmodulus E .

De relatie tussen beide waarden kan volgens onderstaande formule worden omschreven:

$$G = \frac{E}{2 * (1 + \nu)} = \frac{210000}{2 * (1 + 0,3)} = 80769 \text{ N/mm}^2 \quad (47)$$

4.3.4 Analyses

Om de respons van de ligger onder invloed van trek te bepalen, kan gebruikgemaakt worden van diverse rekenmodellen. Hieronder zijn de gebruikte rekenmodellen omschreven.

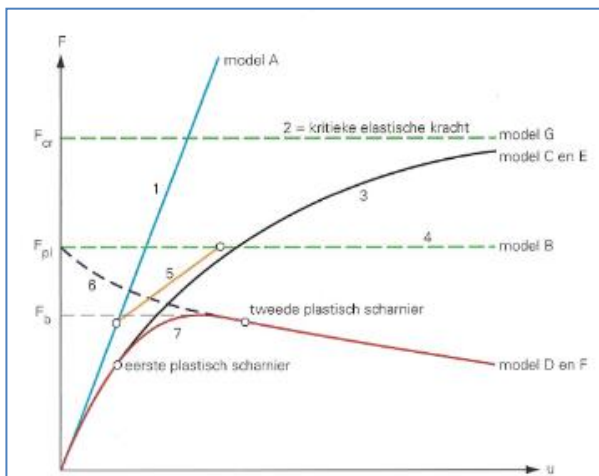
4.3.4.1 LBA (model G van figuur 18)

Om de kritieke elastische kracht te berekenen, is het vereist om de factor α_{cr} te bepalen. Deze factor is de kritieke factor waarbij belastingen verhoogd moeten worden om elastische instabiliteit te veroorzaken.

Dit rekenmodel rekt lineair-elastisch en houdt alleen rekening met kleine verplaatsingen en niet met imperfecties. Met dit model wordt het kritieke elastische moment M_{cr} of de kritieke elastische kracht N_{cr} bepaald. Dit is de theoretische bezwijkbelasting, als het model perfect is en de belastingen perfect aangrijpen en als er geen staaf- en materiaalimperfecties zijn en geen plasticiteit optreedt.

4.3.4.2 GNA (model E van figuur 18)

In dit rekenmodel wordt een analyse uitgevoerd waarbij de geometrie niet-lineair wordt beschouwd, dus bij grote verplaatsingen en vervormingen is dit van invloed op de krachtsverdeling. Dit model houdt rekening met een lineair-elastisch materiaalgedrag en niet met imperfecties. Dit model beschouwt het evenwicht in de vervormde toestand. De relatie bij de model tussen de belasting en de verplaatsing verloopt niet-lineair.



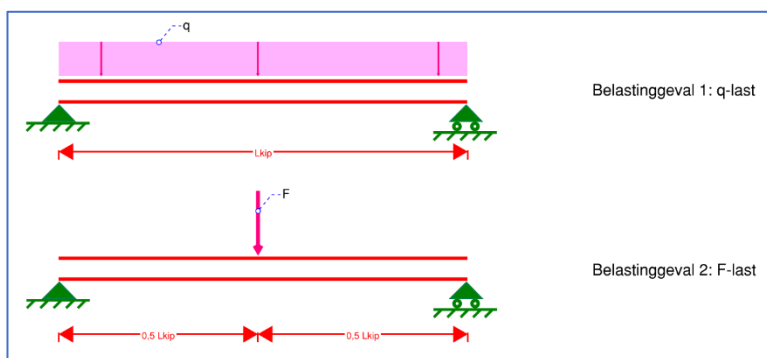
Figuur 18 Rekenmodellen (Snijder et al., 2011)

4.3.4.3 GMNIA (model D van figuur 18)

In dit model wordt een analyse uitgevoerd waarbij zowel de geometrie als het materiaalgedrag niet-lineair worden beschouwd met de invloed van imperfecties. Met dit model wordt de bezwijkbelasting beperkt door de invloed van tweede-orde-effecten die ontstaan door de imperfecties en de invloed van het niet-lineair gedrag van het materiaal en de geometrie.

4.3.5 Beschouwde mechanicaschema's

In de EEM-modellen zijn twee verschillende mechanicaschema's beschouwd. Deze zijn in figuur 19 weergegeven. Het betreffen twee mechanicaschema's met een scharnierende oplegging en een roloplegging.

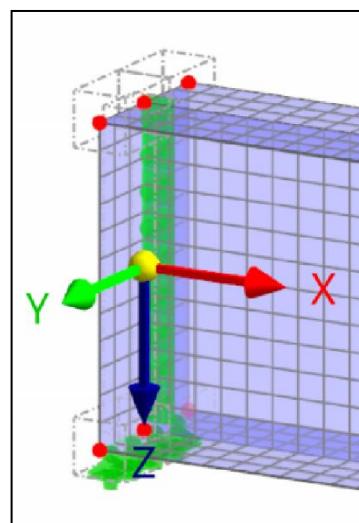


Figuur 19 Beschouwde mechanicaschema's (eigen werk)

De belastingen bestaan uit een gelijkmatig verdeelde belasting en een puntlast. Bij de gelijkmatig verdeelde belasting en de puntlast is onderscheid gemaakt tussen het aangrijpen van de belasting in het hart van de bovenflens en het hart van de onderflens.

4.3.6 Toegepaste randvoorwaarden EEM-modellen

De oplegcondities voor de EEM-modellen worden uitgevoerd als een vrij opgelegde ligger. De onderflens van de ligger wordt bij beide steunpunten in verticale richting verhinderd te verplaatsen en bij de scharnierende oplegging wordt ook het verplaatsen in de horizontale x-richting verhinderd. De ondersteuning van het lijf bestaat uit een lijnvormige ondersteuning die verplaatsing in de horizontale y-richting verhindert. In de literatuur worden vaak puntvormige ondersteuning toegepast die bijvoorbeeld aan het uiteinde van het profiel en in de kruising tussen lijf en flens worden gemodelleerd. Er is echter in dit onderzoek voor gekozen om alle ondersteuning uit te voeren als lijnvormige ondersteuning. Dit is gedaan omdat in het onderzoek grote trekkrachten ingeleid moeten worden in de steunpunten.



Figuur 20 Assenstelsel
(eigen werk)

4.3.7 Verificatie EEM-modellen

Om het rekenmodel te kunnen controleren en te ijken is een basismodel opgesteld. De uitgangspunten van de EEM-modellen zijn geverifieerd door verschillende modellen met elkaar te vergelijken. In eerste instantie is een LBA uitgevoerd voor het basismodel. Het basismodel bestaat uit een vrij opgelegde ligger IPE600 waarbij het optredende moment gelijk is aan $0,25 M_{pl,rd} = (825,32 \text{ kNm} * 0,25 = 206,32 \text{ kNm})$.

Tabel 4 Uitkomsten diverse modellen basismodel

	a_{cr}	M_{ed}	M_{cr}	λ_{LT}
RFEM (plaatmodel IPE600)	3,293	210,04	691,63	1,092
AxisVM (plaatmodel IPE600)	3,391	210,03	712,21	1,075
LTBeam (staafmodel IPE600)	3,794	210,17	797,38	1,017
TS Construct (staafmodel IPE600)	3,861	211,0	814,7	1,006

4.3.8 Modelling belastingen EEM-modellen

De belastingen die zijn aangebracht op de modellen zijn gelijkmatig verdeelde belastingen, puntbelastingen, kopmomenten en axiale trekkrachten. De modellering van deze vier onderdelen zijn hieronder achtereenvolgens beschreven.

4.3.8.1 Gelijkmatig verdeelde belastingen

De gelijkmatig verdeelde belastingen worden gemodelleerd als lijnlast die gepositioneerd wordt in snijpunt tussen de flens en het lijf.

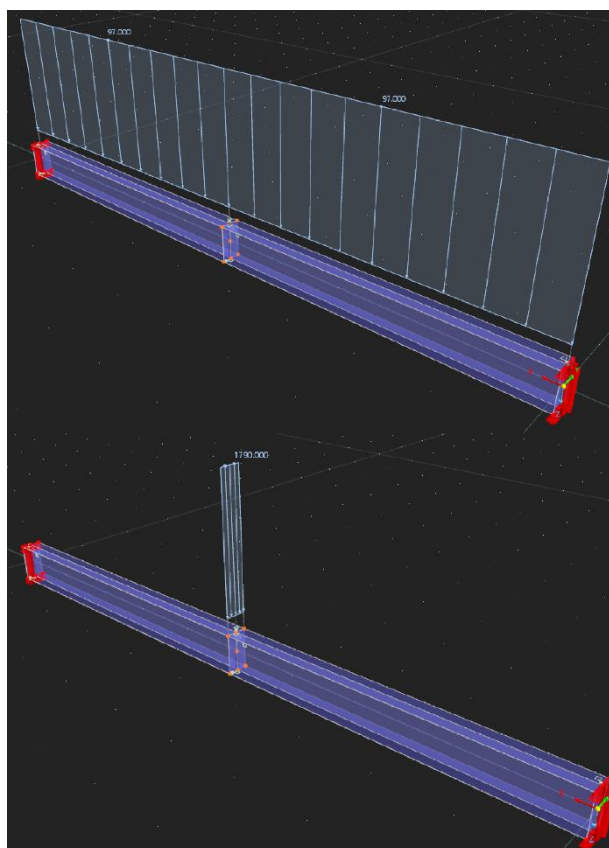
4.3.8.2 Puntlasten

De puntlasten worden gemodelleerd als een gelijkmatig verdeelde belasting in dwarsrichting over de flens. De totale puntlast wordt hierbij gedeeld door de flensbreedte, waardoor een lijnlast ontstaat.

Dit is gedaan om lokale spanningsconcentratie te voorkomen. Het doel van dit onderzoek is de relatie tussen kipstabiliteit en een trekkracht te beschouwen en geen beschouwing van de krachtsinleiding bij een puntlast. Daarom zijn ook ter plaatse van de puntlast schotten met een dikte van 15 mm gemodelleerd.

4.3.8.3 Axiale trekkrachten

De axiale trekkrachten worden aangebracht door een lijnlast aan te brengen op zowel de flensen als op het lijf. Deze lijnlast wordt gevormd door de trekkracht te delen door het profieloppervlak. Tevens is deze lijnlast gerelateerd aan de flens- en lijfdikte. Een dikkere flens betekent meer belasting op de flens, en een relatief dikker lijf betekent meer belasting op het lijf, zodat de belasting evenredig over het profieloppervlak wordt verdeeld. De axiale trekkracht dient aangebracht te worden op de roloplegging zodat over de gehele ligger een trekkracht ontstaat.



Figuur 21 Modellerings belastingen: q-last (boven), F-last (onder) (eigen werk)

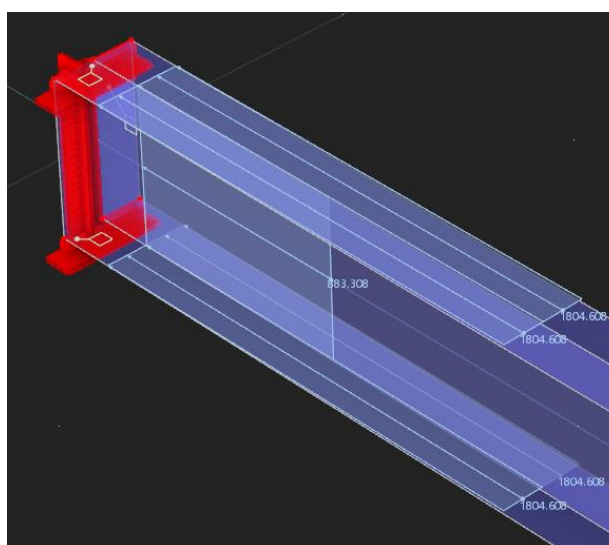
4.3.9 Opleggingen

4.3.9.1 Scharnierende oplegging

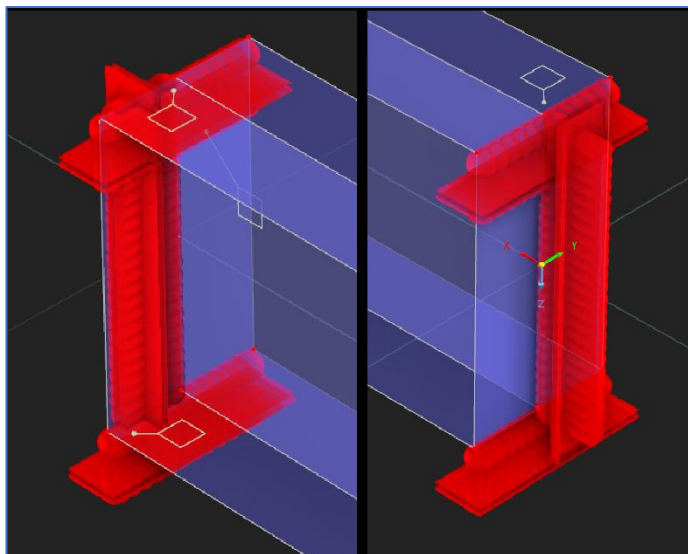
De scharnierende oplegging wordt rechts in figuur 23 weergegeven. De flenzen worden in verticale richting ondersteunt. Het lijf wordt horizontale richting ondersteunt, zowel in de richting van de x-as en y-as.

4.3.9.2 Roloplegging

De roloplegging wordt links in de figuur 23 weergegeven. Ook bij de roloplegging worden de flenzen in verticale richting ondersteunt, daarnaast wordt het lijf in de horizontale richting van de y-as ondersteunt.



Figuur 22 Modellerings axiale trekkracht (eigen werk)



Figuur 23 Roloplegging (links) en scharnierende oplegging (rechts) (eigen werk)

4.3.10 Netfijnheid

Om de netfijnheid van de modellen in RFEM te optimaliseren is een studie uitgevoerd. Hierbij is gevarieerd in elementlengte van 25 mm tot 1000 mm. Uit onderstaande tabel blijkt dat de nauwkeurigheid van de berekeningen gerelateerd is aan fijnheid van het net. Een elementlengte van slechts 25 mm geeft de nauwkeurigste berekening, echter neemt het aantal elementen fors toe. Daarom is besloten om voor de analyses een elementlengte van 50 mm te hanteren.

Tabel 5 Resultaten netverfijning

Elementlengte	Aantal eindige vlak elementen	Aantal knoopelementen	a_{cr}
1000 mm	2108	2193	4,806
500 mm	2060	2137	4,806
250 mm	2060	2137	4,806
125 mm	2076	2153	4,804
50 mm	2076	2209	4,803
25 mm	4224	4237	4,789

4.3.11 Onderbouwing EEM-modellen

Om te bepalen welke berekeningen uitgevoerd moeten worden in RFEM, dient onderzocht te worden wanneer kipinstabiliteit maatgevend is boven de doorsnedetoetsing. Volgens *NEN-EN 1993-1-1:2006+A1:2014+NB:2016 staal* paragraaf 6.3.2.2 mogen effecten van kipinstabiliteit verwaarloosd worden indien voldaan wordt aan één van de twee onderstaande voorwaarden:

1. De kipslankheid is kleiner dan de grensslankheid; de kipslankheid dient dan kleiner of gelijk te zijn aan 0,4;
2. Het maximaal optredende moment in de ligger is kleiner of gelijk aan 0,16 maal het elastische kritische kiplmoment M_{cr} .

Dit is hieronder in formulevorm omschreven:

$$\lambda_{lt} \leq \lambda_{lt,0} \text{ of als } \frac{M_{ed}}{M_{cr}} \leq \lambda_{lt,0}^2 \quad (48)$$

Bovenstaande voorwaarden gelden echter alleen voor de twee toetsingsmethoden met behulp van kipprommen. Hierbij is als grenswaarde voor de kipslankheid van het profiel 20% van de verhouding tussen het plastische weerstandsmoment en het maximaal optredende moment genomen.

$$\lambda_f = \frac{k_c L_c}{i_{f,z} \lambda_1} \leq 0,2 \frac{M_{c,rd}}{M_{y,ed}} \quad (49)$$

Als men gebruik maakt van kipprommen is een vaste methode omschreven om een toetsing op kipstabiliteit uit te voeren:

1.
$$\text{Bepaling } M_{cr} \quad (50)$$

2.
$$\text{Relatieve kipslankheid } \lambda_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} \quad (51)$$

3.
$$\text{Bepaling kipfactor } \chi_{LT} = \frac{1}{\varphi_{LT} + \sqrt{\varphi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad (52)$$

4.
$$\varphi_{LT} = 0,5(1 + a_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - 0,2)) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \quad (53)$$

5.
$$\text{Bepaling unity - check} = \frac{\frac{M_{ed}}{\chi_{LT} W_y f_y}}{\gamma_{M1}} = \frac{M_{ed}}{M_{b,Rd}} \quad (54)$$

Door het uitvoeren van een GNA in combinatie met een axiale trekkracht kan dus stap één worden uitgevoerd en gecontroleerd van de methode om kipinstabiliteit te controleren voor liggers zowel met als zonder axiale trekkracht. Bij het uitvoeren van de GMNIA met de invloed van een axiale trekkracht kan de laatste stap worden uitgevoerd van de methode om kipinstabiliteit te controleren: het bepalen van de reductiefactor χ_{LT} . De GNA heeft betrekking op de kritiek elastisch vergrotingfactor α_{cr} , en een GMNIA levert de daadwerkelijke bezwijkbelasting en daardoor de kipreductiefactor χ_{LT} . Door deze twee verschillende analyses uit te voeren, kan dus aan de voor- en achterkant van de toetsingsmethode voor kipstabiliteit gecontroleerd worden hoe de invloed van een axiale trekkracht werkt.

$$M_{cr} = a_{cr} * M_{ed} \quad (55)$$

$$\chi = \frac{M_{cr}}{M_{pl,Rd}} = \frac{\sigma_{cr}}{f_y} \quad (56)$$

Er zijn modellen opgesteld voor de GMNIA's. Er is onderzocht welke trekkrachten aangebracht worden. Deze trekkrachten worden uitgedrukt in een percentage van de maximaal opneembare trekkracht $N_{t,Rd}$ van de ligger. In eerste instantie zijn axiale trekkrachten ingevoerd met een waarde van respectievelijk 25%, 50% en 75% van $N_{t,Rd}$. Echter is tijdens de berekeningen gebleken dat een axiale trekkracht ter grootte van 75% $N_{t,Rd}$ geen meerwaarde oplevert omdat de ruimte in het profiel voor spanningen ten gevolge van een moment beperkt is. Daarom is gekozen om axiale trekkrachten met een waarde van respectievelijk 25% en 50 % van $N_{t,Rd}$ in te voeren. Hiermee wordt dus de bezwijkbelasting van de liggers bepaald. In de GNA's wordt deze bezwijkbelasting ingevoerd om de kritische elastische lastfactor a_{cr} en dus het kritisch elastische kipmoment M_{cr} te bepalen.

Tabel 6 Overzicht axiale trekkrachten

Profiel	$N_{t,Rd}$ [kN]	25 % $N_{t,Rd}$ [kN]	50 % $N_{t,Rd}$ [kN]
HEB600 – S235JR	6345	1586	3173
IPE600 – S235JR	3666	917	1833
HEA360 – S235 JR	3361	840	1680
IPE360 – S235JR	1709	427	855
HEA240 – S235JR	1805	451	902
IPE240 – S235JR	919	230	459

5. Resultaten

5.1 Literatuuronderzoek

5.1.1 Mate van conservatisme in de vereenvoudigde rekenmethode

De drie verschillende rekenmethodes om de kipweerstand te bepalen, die worden omschreven in artikel 6.3.2 van *NEN-EN 1993-1-1:2006+A1:2014+NB:2016 staal – Algemene Regels* zijn vergeleken om te kunnen bepalen hoe conservatief de vereenvoudigde toetsingsmethode is om de kipweerstand van een profiel te bepalen.

Tabel 7 Overzicht verschillen met vereenvoudigde methode volgens artikel 6.3.2.4

	Artikel 6.3.2.2 - Algemene methode		Artikel 6.3.2.3 - Specifieke methode	
	Min (5 m)	Max (30 m)	Min (5 m)	Max (30 m)
IPE600	- 12 %	+ 488 %	0 %	+ 604 %
IPE360	- 12 %	+ 640 %	+ 6 %	+ 800 %
IPE240	+ 30 %	+ 1100 %	+ 57 %	+1300 %
HEM1000	- 11 %	+ 392 %	- 3 %	+ 471 %
HEM600	- 5 %	+ 577 %	+ 4 %	+ 654 %
HEM360	- 1 %	+ 885 %	+ 6 %	+ 937 %
HEM240	+ 7 %	+ 1300 %	+ 15 %	+1378 %
HEB1000	- 15 %	+ 365 %	- 4 %	+442 %
HEB600	- 5 %	+ 533 %	+ 6 %	+ 624 %
HEB360	- 3 %	+ 663 %	+ 7 %	+ 748 %
HEB240	- 4 %	+ 1000 %	+ 17 %	+1140 %
HEA1000	- 16 %	+ 233 %	- 5 %	+ 402 %
HEA600	- 6 %	+ 467 %	+ 5 %	+ 557 %
HEA360	- 5 %	+ 587 %	+ 8 %	+ 677 %
HEA240	+ 7 %	+ 800 %	+ 17 %	+ 943 %

Uit de uitgevoerde berekeningen blijkt dat er grote verschillen zijn tussen de twee berekeningsmethodes met kipkrommen en de vereenvoudigde methode. Opvallend is ook dat bij een gedrongen ligger de vereenvoudigde toetsingsmethode gunstiger is dan de reguliere methoden met kipkrommen.

Tabel 4 is opgesteld op basis van belastinggevallen waarbij uitsluitend gekeken is naar de verschillen tussen de verschillende rekenmethodes. Het verwaarlozen van de kipeffecten volgens artikel 6.3.2.2. (4) van *NEN-EN 1993-1-1:2006+A1:2014+NB:2016 staal* is hierin niet meegenomen. Hiervoor is gekozen omdat bij deze controle het optredende moment bekend dient te zijn. In feite betekent het dat kipinstabiliteit verwaarloosd mag worden als het optredende moment M_{ed} 6,25 maal zo klein is als het kritieke elastische kipmoment M_{cr} .

5.1.2 Uitgewerkt rekenvoorbeeld voor vergelijking relatieve kipslankheid

De beschouwde methodes om de kipslankheid te bepalen zijn uitgewerkt in zeven rekenvoorbeelden om inzichtelijk te maken hoe groot de verschillen zijn per methode. Het kritieke elastische kipmoment M_{cr} is met behulp van LTBeamN bepaald. Hierbij zijn diverse mechanicaschema's doorgerekend. Het profiel is IPE270. Er is uitgegaan van een rekenwaarde als moment van 62,5 kNm.

Tabel 8 Relatieve kipslankheid IPE270 met verschillende belastingschema's (rekenwaarde moment M_{ed} : 62,5 kNm)

		F-last 10 m Onder	F-last 10 m DC	F-last 10 m Boven	q-last 10 m Onder	q-last 10 m DC	q-last 10 m Boven	Med 10 m (2x)	Med 10 m (1x)
	$LT_{Beam}: \sqrt{\frac{W_y * f_y}{M_{cr,LTBeam}}}$ Compleet profiel	1,406	1,545	1,702	1,569	1,693	1,827	1,799	1,341
	$LT_{Beam}: \sqrt{\frac{W_y * f_y}{M_{cr,LTBeam}}}$ Gedrukt T-stuk	1,879 (-34%)	2,043 (-32%)	2,260 (-33%)	2,098 (-34%)	2,270 (-34%)	2,463 (-35%)	3,175 (-77%)	1,925 (-44%)
1)	$\sqrt{\frac{W_y * f_y}{M_{cr}}}$ (EC3)	1,413 (\approx)	1,550 (\approx)	1,702 (\approx)	1,560 (\approx)	1,685 (\approx)	1,821 (\approx)	1,791 (\approx)	1,354 (\approx)
2)	$\zeta \sqrt{\frac{L * h * f_y}{b * t_f * E}}$	1,955 (-39%)	1,955 (-27%)	1,955 (-15%)	1,955 (-25%)	1,955 (-16%)	1,955 (-7%)	1,955 (-9%)	1,955 (-46%)
3)	$\frac{k_c L_c}{i_{f,z} \lambda_1}$	2,650 (-88%)	2,650 (-72%)	2,650 (-56%)	2,893 (-85%)	2,893 (-71%)	2,893 (-59%)	3,078 (-71%)	2,339 (-74%)
4)	$\sqrt{\frac{A_c * f_y}{N_{cr,c,z}}}$	1,808 (-29%)	1,979 (-28%)	2,289 (-35%)	1,796 (-15%)	2,164 (-28%)	2,502 (-37%)	2,306 (-28%)	1,752 (-31%)
5)	$\frac{1}{\sqrt{c_1}} * 0,9 * \lambda_z * \sqrt{\beta_w}$	2,765 (-97%)	2,765 (-79%)	2,765 (-62%)	3,005 (-92%)	3,005 (-78%)	3,005 (-65%)	3,195 (-78%)	2,415 (-80%)
6)	$\sqrt{\frac{W_y * f_y}{M_{cr,y0}}}$	2,151 (-53%)	2,344 (-52)	2,600 (-53)	2,367 (-51%)	2,549 (-51%)	2,782 (-52%)	2,709 (-51%)	2,049 (-53%)

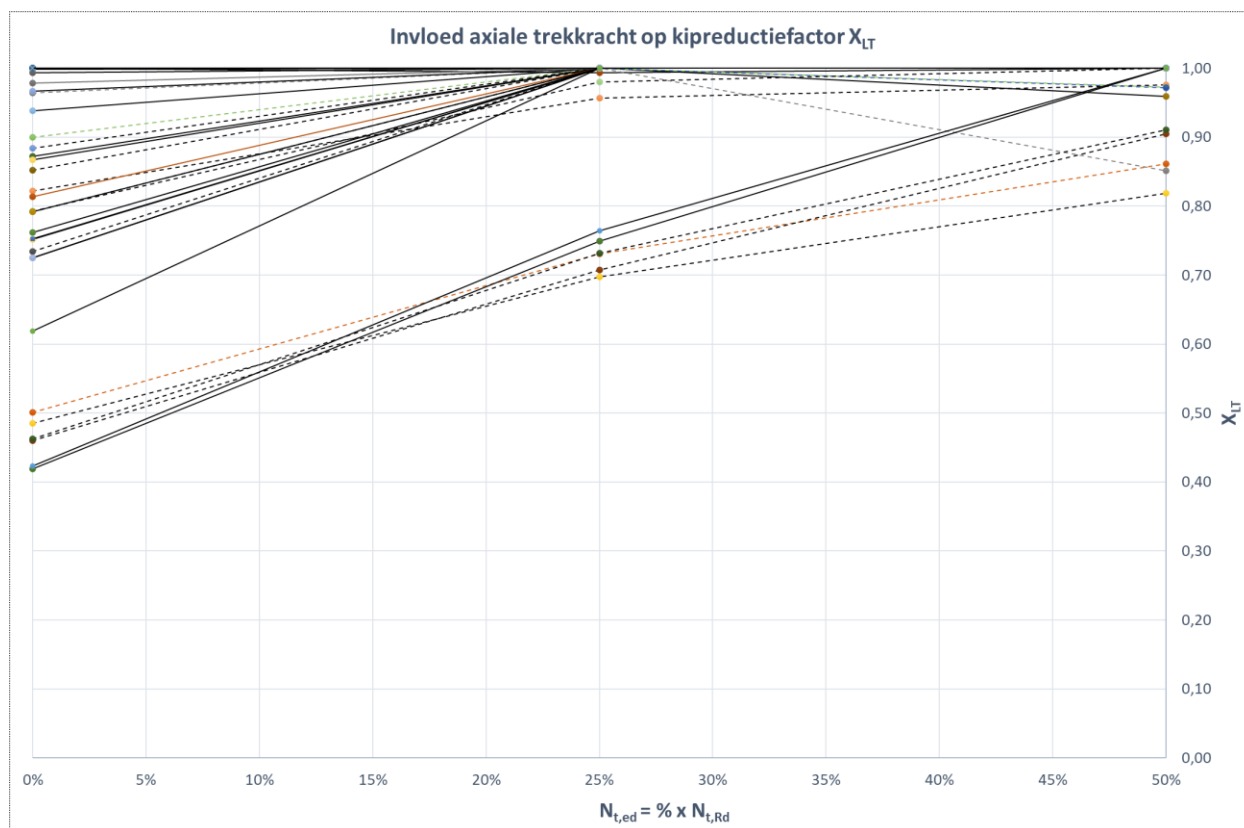
In tabel 6 zijn de waarden van de relatieve kipslankheid samengevat bij verschillende methoden. Uit deze tabel blijkt dat methode 2 en 4 het meest geschikt zijn om te gebruiken bij het bepalen van de relatieve kipslankheid van het gedrukte T-profiel. Voor methode 2 geldt echter dat deze methode enkele beperkingen heeft omdat geen rekening gehouden wordt met de positie van de belasting ten opzichte van het dwarskrachtcentrum van de ligger; en de kipslankheid wordt bepaald op basis van het gehele profiel. In methode vier zijn eigenlijk alle onderdelen toegevoegd die in de bestaande methode ontbreken: de positie van de belasting en de torsiestijfheid van de totale ligger.

5.2 Numeriek onderzoek

Om een beeld te krijgen van de gunstige werking van de axiale trekkracht, worden de resultaten van de GNA's en GMNIA's samengenomen om een nieuwe rekenmethode te ontwikkelen om de invloed van trek op de kipinstabiliteit te implementeren.

5.2.1 Resultaten GNA's en GMNIA's

Uit de GNA's volgt het kritieke elastische kipmoment M_{cr} dat is gebruikt om de relatieve kipslankheid te bepalen. Uit de GMNIA's is de bezwijkbelasting en de kipreductiefactor χ_{LT} bepaald die op de verticale as is aangegeven. Op de horizontale as is het aandeel axiale trekkracht aangegeven. Uit de grafiek blijkt dat bij sommige profielen een axiale trekkracht ter grootte van 50% $N_{t,Rd}$ juist ongunstiger werkt op de kipstabiliteit. Alle resultaten van de GNA's en GMNIA's zijn in bijlage 4 in tabelvorm bijgevoegd en in bijlage 5 in grafiekvorm. Bijlage 6 en 7 bevatten de uitvoer van RFEM.



Figuur 24 Grafiek resultaten GNA's & GMNIA's (eigen werk)

6. Conclusies

6.1 Beantwoording deelvraag 1

Hoe conservatief is de bestaande vereenvoudigde toetsingsmethode voor kipstabiliteit?

De vereenvoudigde methode is conservatief ten opzichte van de toetsingsmethoden met kipkrommen. Hoe conservatief de vereenvoudigde methode is, hangt af van een aantal factoren, zoals profiel, mechanicaschema en overspanning. Uit de vijftien profielen die zijn gecontroleerd komen grote verschillen naar voren.

Algemene kipkrommen & de vereenvoudigde toetsingsmethode

Voor een gedrongen ligger met een korte overspanning van vijf meter is de vereenvoudigde methode bij 80% van de gecontroleerde profielen gunstiger dan de methode met algemene kipkrommen. Voor een slanke ligger met een grote overspanning van dertig meter is de vereenvoudigde toetsingsmethode zeer conservatief. Het verschil tussen capaciteit varieert tussen de 230% en 1300%. Dat betekent dat in het ongunstigste geval met de vereenvoudigde methode slechts 7,1% van de capaciteit benut kan worden ten opzichte van de toetsingsmethode met algemene kipkrommen.

Kipkrommen voor gewalste profielen & de vereenvoudigde toetsingsmethode

Het verschil tussen de vereenvoudigde methode en de kipkrommen voor gewalste profielen is minder groot dan bij de algemene methode, maar desondanks nog steeds groot. Bij een korte ligger van vijf meter varieert het verschil tussen de -3% en +57%. Als gekeken wordt naar een lange ligger van dertig meter kan met de kipkrommen voor gewalste profielen tussen de 6,8% en 18,1% meer capaciteit worden benut.

Uit analyses blijkt dat de vereenvoudigde methode voor lange liggers zeer conservatief is. Bij het toetsen van een korte ligger op kipstabiliteit kan de vereenvoudigde methode echter zeker effectief en snel zijn.

6.2 Beantwoording deelvraag 2

Welke aanpassingen zijn nodig aan de vereenvoudigde toetsingsmethode voor kipstabiliteit, zodat een praktische en betrouwbare methode ontstaat?

Om de vereenvoudigde methode aan te passen tot een praktische, betrouwbare en realistische methode, dient de toetsing van de slankheid ofwel de relatieve kipslankheid aangepast te worden. De relatieve slankheid wordt in de aangepaste methode bepaald op basis van het oppervlak van de gedrukte flens en de kritieke elastische knikkracht van de gedrukte flens in de zwakke richting.

Het oppervlak van de gedrukte flens wordt bepaald door de belastingpositie ten opzichte van het dwarskrachtcentrum. In onderstaande formules is de aangepaste methode weergegeven volgens Schaper et al. (2019).

$$M_{b,Rd} = \chi_{c,z} * W_y * \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (57)$$

$$\lambda_{c,z} = \sqrt{\frac{A_c * f_y}{N_{cr,c,z}}} \quad (58)$$

$$A_c = \text{oppervlak van het gedrukte deel van de ligger}$$

$$A_c = A_f + (0,5 * A_w) \text{ (belasting gepositioneerd op gedrukte flens)}$$

$$A_c = A_f + (1/6 * A_w) \text{ (belasting gepositioneerd in dwarskrachtcentrum)} \quad (59)$$

$$A_c = A_f \text{ (belasting gepositioneerd onder getrokken flens)}$$

$$\lambda_{c,z,mod} = k_c * \beta_c * \bar{\lambda}_{c,z} \quad (60)$$

$$\beta_c = \sqrt{\frac{0,06 * \frac{h}{t_f}}{\bar{\lambda}_{c,z} + 1}} \leq 2,0 \quad (61)$$

$$N_{cr,c,z} = \frac{\pi^2 * E * I_{c,z}}{L_{cr}^2} = \text{kritieke elastische knikkraft zwakke as T – stuk} \quad (62)$$

$$I_{c,z} \approx \frac{1}{12} * t_f * b^3 \quad (63)$$

6.3 Beantwoording deelvraag 3

Wat is de invloed van een normaaltrekkraft op de kipstabiliteit en hoe kan deze in rekening worden gebracht bij het toetsen van kipstabiliteit?

Invloed van een normaaltrekkraft op kipstabiliteit

De invloed van een axiale trekkraft in een ligger die gecontroleerd moet worden op kipinstabiliteit werkt zoals verwacht gunstig. De axiale trekkraft stabiliseert als het ware de ligger tegen het omkantelen en wegdraaien van de gedrukte flens. In onderstaande grafiek is weergegeven hoe effectief een axiale trekkraft werkt bij een toetsing van kipstabiliteit. Uit de resultaten blijkt dat de reductiefactor χ_{LT} gemiddeld gelijkmatig toeneemt. Ook blijkt dat bij een hoge kipreductiefactor zonder trek de axiale trekkraft van 25% veel gunstiger werkt. Eveneens blijkt dat bij relatief grote profielen het effect van een axiale trekkraft op de kipstabiliteit minder is als bij een klein profiel.

Om de invloed van een axiale trekkraft te kunnen gebruiken als gunstige werking op de kipstabiliteit, dient dit geïmplementeerd te worden in de bestaande toetsingsmethoden. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen enerzijds de methodes gebaseerd op kipprommen en anderzijds de vereenvoudigde toetsingsmethode.

Implementeren axiale trekkracht bij toetsing kipstabiliteit – methodes met kipprommen

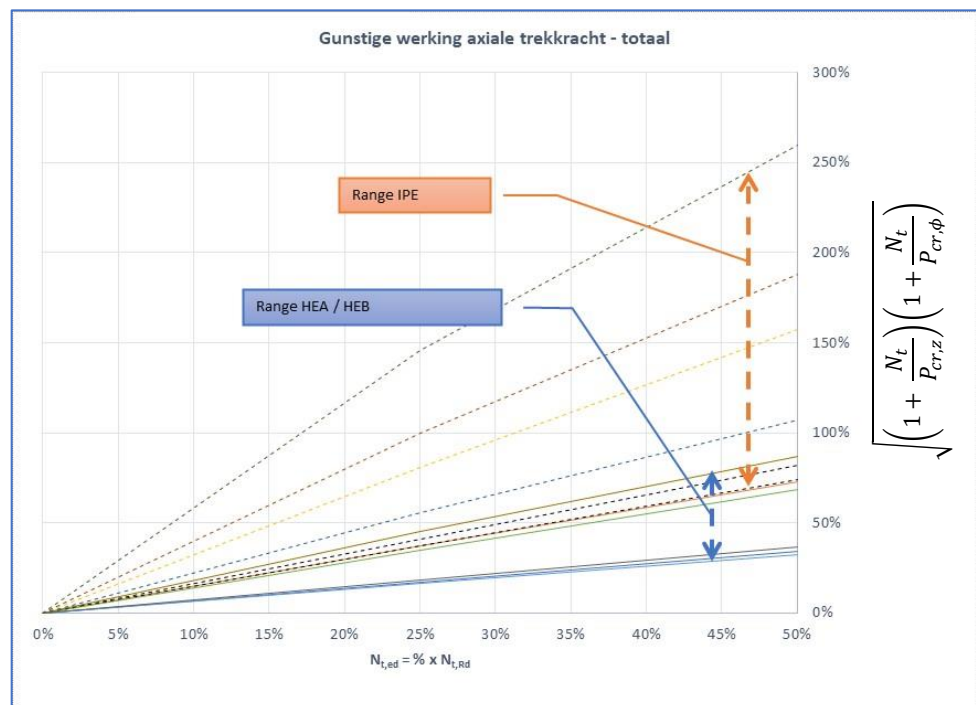
De methodes die gebruikmaken van kipprommen zijn gebaseerd op het kritieke elastische kipmoment M_{cr} . Door de invloed van de axiale normaalkracht mee te nemen kan de gunstig werkende invloed hiervan worden meegenomen in het kritieke elastische kipmoment. Geadviseerd wordt om onderstaande formules te implementeren in de bestaande rekenregels voor het toetsen van kipstabiliteit. Hierin is $M_{cr}(0)$ het kritieke elastische kipmoment zonder de invloed van een axiale normaalkracht. Naast een axiale trekkracht is het daarnaast aan te bevelen ook de invloed van een axiale drukkracht in de berekening van het kritieke elastische kipmoment mee te nemen.

$$M_{cr}(N_t) = \sqrt{\left(1 + \frac{N_t}{P_{cr,z}}\right)\left(1 + \frac{N_t}{P_{cr,\phi}}\right)} M_{cr}(0) = \text{axiale trekkracht} \quad (64)$$

$$M_{cr}(N_t) = \sqrt{\left(1 - \frac{N_t}{P_{cr,z}}\right)\left(1 - \frac{N_t}{P_{cr,\phi}}\right)} M_{cr}(0) = \text{axiale drukkracht} \quad (65)$$

Door gebruik te maken van de hierboven omschreven vergrotingsfactor is de kipreductiefactor χ_{LT} bepaald die hoort bij de axiale trekkracht. In onderstaande grafiek is de range en de vergrotingsfactor weergegeven. Hieruit valt direct op dat een axiale trekkracht bij een IPE-profiel veel gunstiger werkt dan bij een HEA- of HEB-profiel. Als uitgegaan wordt van een axiale trekkracht met een waarde van 50% van $N_{t,rd}$ dan ligt de vergrotingsfactor bij een IPE-profiel tussen de 1,6 en 2,6.

Bij dezelfde axiale trekkracht ligt de vergrotingsfactor voor een HEA- of HEB-profiel tussen de 1,3 en 1,8. In bijlage 9 is een compleet overzicht terug te vinden van alle gecontroleerde profielen en de invloed van een axiale trekkracht op de kipstabiliteit.



Figuur 25 Grafiek gunstige axiale trekkracht - IPE vs. HEA & HEB (eigen werk)

Vereenvoudigde toetsingsmethode

Onder paragraaf 5.2 zijn de aanpassingen van de bestaande vereenvoudigde methode reeds omschreven. Om de invloed van een axiale trekkracht te implementeren in de vereenvoudigde toetsingsmethode voor kipstabiliteit, worden de genoemde formules in paragraaf 5.2 gebruikt. De formules voor het implementeren van de axiale trekkracht zijn hieronder weergegeven. Naast een axiale trekkracht is het ook mogelijk om een axiale drukkracht die aanwezig is in de ligger mee te nemen in de berekening van de kritieke elastische knikkracht van de gedrukte flens. Een axiale drukkracht resulteert in een kleinere kritieke elastische knikkracht, waardoor de relatieve kipslankheid groter wordt.

$$N_{cr,c,z}(N_c) = \sqrt{\left(1 - \frac{N_c}{P_{cr,z}}\right)\left(1 - \frac{N_c}{P_{cr,\phi}}\right)} N_{cr,c,z}(0) = \text{axiale drukkracht} \quad (66)$$

$$N_{cr,c,z}(N_t) = \sqrt{\left(1 + \frac{N_t}{P_{cr,z}}\right)\left(1 + \frac{N_t}{P_{cr,\phi}}\right)} N_{cr,c,z}(0) = \text{axiale trekkracht} \quad (67)$$

6.4 Beantwoording hoofdvraag

Op welke wijze dient de conservatieve vereenvoudigde toetsingsmethode verbeterd te worden, waarbij tevens de gunstige invloed van trek is meegenomen?

Om de vereenvoudigde methode te verbeteren, dient de bepaling van de relatieve kipslankheid aangepast te worden. Hierbij wordt de invloed van de lastpositie ten opzichte van het dwarskrachtcentrum en de torsiestijfheid van het profiel in de bestaande vereenvoudigde methode in rekening gebracht. Dit levert een vereenvoudigde methode op die een goede weergave van de werkelijkheid is. Tegelijk laat het onderzoek zien dat de vereenvoudigde methode circa 30% à 35% afwijkt van de nauwkeurige methodes met behulp van kipprommen. De vereenvoudigde toetsingsmethode voor kipstabiliteit is toereikend en verantwoord om een snelle, grove controle te doen. Het is bij nauwkeurige toetsingen echter aan te bevelen om de methodes met kipprommen te hanteren.

De invloed van een axiale trekkracht kan in de vereenvoudigde toetsingsmethode worden geïmplementeerd door de kritieke elastische knikkracht te vermenigvuldigen met de wortel uit de resultante van de kritieke elastische knikkracht van de zwakke as en de kritieke elastische torsiekracht. Ook is het mogelijk door het verwisselen van het minteken door een plusteken om de invloed van een axiale drukkracht in de berekening van de kritieke elastische knikkracht van het gedrukte T-stuk te implementeren. Uit de resultaten is gebleken dat een axiale trekkracht bij een IPE-profiel gunstiger werkt dan bij een HEA- of HEB-profiel. Dit is het gevolg van het Wagner-effect. Door het toevoegen van een axiale trekkracht wordt de torsiestijfheid van de ligger vergroot. Bij smalle, hoge profielen is dit effect groter dan bij gedrongen profielen. Een axiale drukkracht werkt juist andersom: dit resulteert in een lagere torsiestijfheid.

7. Discussie

7.1 Validiteit & betrouwbaarheid

7.1.1 Validiteit

Zoals uit het onderzoek is gebleken komen de resultaten van de handberekeningen en de computerberekeningen RFEM en LTBeamN goed met elkaar overeen. Eén onderdeel van het onderzoek was om de invloed van een axiale trekkracht in beeld te krijgen. Dit is gelukt en tevens is de invloed van een axiale trekkracht geïmplementeerd in de vereenvoudigde toetsingsmethode en de methodes met kipkrommen. Ook is de invloed van de torsiestijfheid en de lastpositie onderzocht, en is dit eveneens geïmplementeerd in de vereenvoudigde toetsingsmethode.

7.1.2 Generaliseerbaarheid

In het onderzoek is slechts een klein gedeelte van alle IPE, HEA, HEB, en HEM-profielen getoetst en beschouwd. Er is gekozen voor profielen die sterk van elkaar verschillen om de scope van het onderzoek zo breed mogelijk te maken. Daarnaast is er ook voor gekozen om slanke en gedrongen liggers te onderzoeken om zo de directe verschillen tussen de profielen te zien. Een voorbeeld hiervan zijn de profielen HEB600 en IPE600. Een HEB600 is een gedrongen profiel; een IPE600 is juist een slank profiel. Uit de resultaten blijkt dat het gunstige effect van een axiale trekkracht bij een IPE600 twee keer zo groot dan bij een HEB600.

Dit voorbeeld toont aan dat een axiale trekkracht een gunstigere werking heeft bij een IPE-profiel dan bij een HEB-profiel. Dit geldt niet alleen voor de gecontroleerde profielen, ook voor de overige IPE-, en HEB-profielen. Uit het onderzoek volgt eveneens dat het verschil tussen een IPE-profiel en een HEB-profiel toeneemt naarmate de profielen kleiner worden. De GMNIA's en GNA's zijn uitgevoerd met een lengte van 5m en 10m. Uit de analyses blijkt dat de invloed van een axiale trekkracht lineair verloopt. Dit betekent dat voor langere lengtes de invloed eenvoudig te bepalen is. De variatie in lengte is hierdoor geen beperkte factor voor de resultaten.

7.1.3 Betrouwbaarheid

Om de betrouwbaarheid van het onderzoek te waarborgen, is zowel bij het literatuuronderzoek als bij het numeriek onderzoek een vaste structuur aangehouden: controle en ijking van het basismodel, waarna het basismodel als uitgangspunt geldt. De resultaten van de handberekeningen en computerberekeningen zijn met elkaar vergeleken, en hieruit blijkt dat deze overeenkomen. Er zijn echter enkele kleine verschillen, zoals de invloed van afrondingsstralen bij gewalste profielen.

7.1.4 Reproduceerbaarheid

Het onderzoek is gestructureerd opgebouwd waarbij eerst GMNIA's en daarna GNA's zijn uitgevoerd. Ook is hierbij steeds dezelfde structuur aangehouden: mechanicschema's met gelijkmatig verdeelde belasting en puntlast. Om de uitgevoerde analyses te duiden is de invoer en uitvoer bijgevoegd in bijlage 6 en 7 bij dit rapport.

7.1.5 Interpretatie resultaten

Alle resultaten uit het onderzoek laten zien dat een axiale trekkracht in een ligger een gunstige werking heeft op de kipstabiliteit van een ligger. Hiermee kan worden geconcludeerd dat het negeren van een axiale trekkracht een conservatieve benadering is van de werkelijkheid. Vooral bij kleine IPE-profielen is de invloed groot. Tevens blijkt dat het negeren van de torsiestijfheid en de lastpositie geen juiste weergave is van de werkelijke situatie. Door de invloed van deze factoren in de vereenvoudigde methode te implementeren is deze methode verder geoptimaliseerd.

7.2 Beperkingen

Deze paragraaf bespreekt de beperkingen van het onderzoek en de mogelijke gevolgen.

7.2.1 Beschouwde profielen GNA- & GMNIA-berekeningen

Voor het uitvoeren van de GNA en GMNIA zijn zes verschillende profielen gebruikt. Gezien het profielenbestand van IPE-, HEM-, HEB- en HEA-profielen verder reikt dan deze zes beschouwde profielen, kan in twijfel worden getrokken of deze profielen een goede weergave zijn van alle profielen.

Door diverse profielen toe te passen is geprobeerd om naast de invloed van een axiale trekkracht in het algemeen, ook de verschillen tussen de profielen in kaart te brengen. Zo zijn gedrongen profielen met een nagenoeg gelijke hoogte-breedteverhouding onderzocht, maar zijn ook slanke profielen toegepast waar de hoogte-breedteverhouding sterk uiteen loopt. Hierdoor is het niet nodig om alle beschikbare profielen te toetsen, maar slechts diegene waarin sprake is van grote verschillen tussen profielen, zodat de invloed van beide profielen duidelijk kan worden vergeleken. Een voorbeeld hiervan is een slank profiel IPE600 en een semi-slank profiel HEB600.

7.2.2 Afrondingstralen staalprofielen

In dit onderzoek is gekeken naar de relatie tussen het bezwijken van een ligger op kipinstabiliteit in combinatie met een axiale trekkracht. In de EEM-modellen zijn de stalen liggers echter gemodelleerd als plaatmodellen zonder afrondingstralen. Het is inderdaad waar dat de afrondingstralen invloed hebben op de kipstabiliteit van de ligger. Vooral voor profielen die klein zijn, telt het aandeel van de afrondingstralen zwaar mee. Achteraf gezien was het verstandiger geweest om hier meer aandacht voor te hebben en dit te verdisconteren door een fictief oppervlak ter plaatse van de afrondingstralen aan te brengen in de EEM-modellen.

7.2.3 Restspanningen

Restspanningen zijn spanningen die aanwezig zijn in een gewalst of gelast staalprofiel. Deze spanningen ontstaan omdat uitstekende delen van een staal profiel tijdens het las-, of walsproces sneller afkoelen dan inwendige delen. In dit onderzoek is de invloed van restspanningen niet direct in de berekening geïmplementeerd door eigenspanningen te definiëren. In de GNA's en GMNIA's zijn de eigenspanningen niet direct ingevoerd, echter wordt de invloed van restspanningen indirect wel meegenomen in de GMNIA's omdat hier gerekend wordt met niet-lineair materiaal-gedrag.

8. Aanbevelingen

8.1 Vervolgonderzoek

Invloed waarde axiale trekkracht

Er is in dit onderzoek gerekend met de invloed van een axiale trekkracht met een waarde van 25% N_{Rd} en 50% $N_{t,Rd}$. Uit figuur 24 blijkt dat de invloed van de eerste 25% veel effectiever is dan 50%. Het is zeker de moeite waard en ook aan te bevelen om onder die 25% te onderzoeken wanneer een trekkracht het meest gunstige effect heeft op de kipinstabiliteit van een ligger.

Excentrische trekkracht

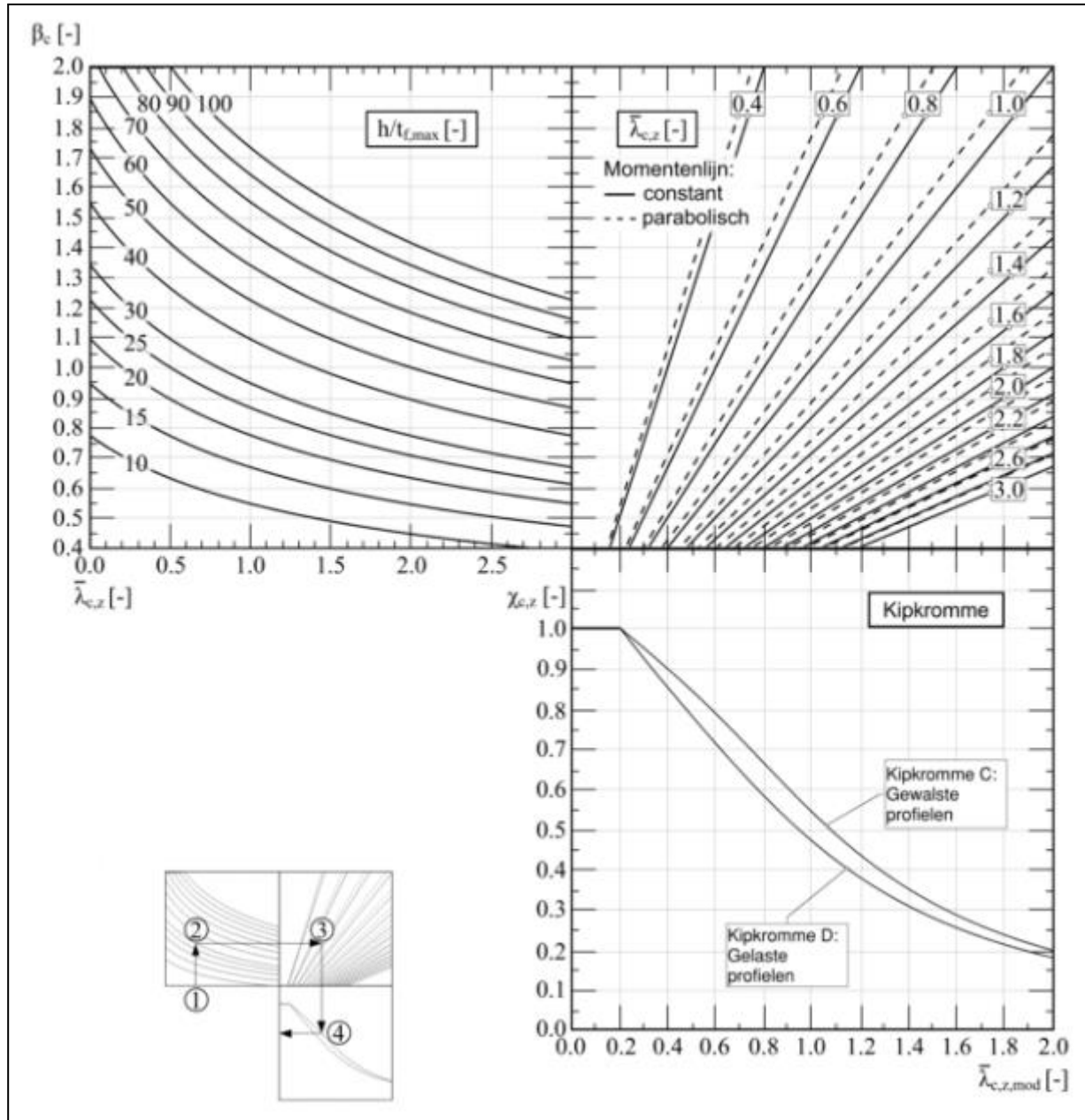
In dit onderzoek is gekeken naar de relatie tussen een axiale trekkracht die centrisch in de ligger aanwezig is en kipstabiliteit. Gezien de resultaten is het sterk aan te bevelen om vervolgonderzoek uit te voeren waarbij niet alleen gekeken wordt naar een centrische trekkracht, maar waarbij ook een excentrische trekkracht aanwezig is.

Wringmomenten & torsie

Naast axiale trek- of drukkrachten is het ook mogelijk dat andere krachten in een ligger invloed hebben op de kipinstabiliteit. Een onderwerp dat nog nader onderzoek vergt, is de invloed van wringen en torsiemomenten. Omdat bij kipinstabiliteit rotatie van het profiel rond de ligger-as optreedt, zullen ook torsie- en wringspanningen ontstaan. Een goed voorbeeld hiervan is een kraanbaan die naast een verticale last ook belast wordt met een horizontale last. Over dit onderwerp is nog niet veel literatuur beschikbaar en het verdient dus nader onderzoek.

8.2 Ontwerptabel vereenvoudigde toetsingsmethode

Om de vereenvoudigde methode voor de ontwerper toegankelijker te maken, is voor de aangepaste toetsingsmethode reeds door Schaper et al. (2019) een ontwerptabel in de vorm van een nomogram opgesteld. Door bij de bepaling van de relatieve kipslankheid $\lambda_{c,z}$ de gunstige werking van de axiale trekkracht te implementeren, kan deze tabel gebruikt worden. De ingangsparameter in de grafiek is de relatieve slankheid. In deze relatieve slankheid kan de invloed van een axiale trekkracht geïmplementeerd worden. Tevens wordt de invloed van de lastpositie en de torsiestijfheid van de ligger hierin meegenomen. In bijlage 8 bij dit rapport is het nomogram bijgevoegd met informatie over het gebruik ervan. Hieronder is eveneens het nomogram met stappenplan weergegeven.



Figuur 26 Nomogram vereenvoudigde toetsingsmethode voor kipstabiliteit – vertaald (Knobloch & Kuhlmann, 2020)

Stappenplan bepaling opneembaar kippmoment met vereenvoudigde methode

Stap 1: Bepaal oppervlak A_c :

$$A_c: A_f + (0,5 * A_w) = \text{last op gedrukte flens}$$

$$A_c: A_f + \left(\frac{A_w}{6}\right) = \text{last in dwarskrachtcentrum}$$

$$A_c: A_f = \text{last onder getrokken flens}$$

Stap 2: bepaal $N_{cr,cz}$

$$N_{cr,t,z,trek} = \frac{\pi^2 * E * I_{c,z}}{L_{cr}^2} * \sqrt{\left(1 + \frac{N_t}{P_{cr,z}}\right) \left(1 + \frac{N_t}{P_{cr,\phi}}\right)}$$

$$N_{cr,c,z,druk} = \frac{\pi^2 * E * I_{c,z}}{L_{cr}^2} * \sqrt{\left(1 - \frac{N_c}{P_{cr,z}}\right) \left(1 - \frac{N_c}{P_{cr,\phi}}\right)}$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 * E * I_{c,z}}{L_{cr}^2} \text{ (geen axiale kracht)}$$

Stap 3: kipslankheid $\lambda_{c,z}$:

$$\lambda_{c,z} = \sqrt{\frac{A_c * f_y}{N_{cr,c,z}}}$$

Stap 4: bepaal h/t_f :

$$\frac{h}{t_f}$$

Stap 5: torsiefactor β_c :

$$\beta_c = \sqrt{\frac{0,06 * \frac{h}{t_f}}{\bar{\lambda}_{c,z} + 1}} \leq 2,0$$

Stap 6: kipslankheid $\bar{\lambda}_{c,z,mod}$:

$$\bar{\lambda}_{c,z,mod} = k_c * \beta_c * \bar{\lambda}_{c,z}$$

Stap 7: hulpfactor ϕ

$$\phi = 0,5 * [1 + \alpha(\bar{\lambda}_{c,z,mod} - 0,2) + \bar{\lambda}_{c,z,mod}^2]$$

Stap 8: kipreductiefactor $\chi_{c,z}$:

$$\chi_{c,z} = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 + \bar{\lambda}_{c,z,mod}^2}}$$

Stap 9: opneembaar kippmoment $M_{b,Rd}$:

$$M_{b,Rd} = \chi_{c,z} * W_y * \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

Literatuurlijst

- [1] Bodén, V., & Lundin, S. (2019). *Stability design of steel structures*. Gothenburg: Chalmers University of Technology. Opgeroepen op mei 20, 2023, van <https://odr.chalmers.se/server/api/core/bitstreams/8cfaa19c-b3de-4e32-b911-0e85a0fod9ad/content>
- [2] Brown, D. (2016, May). *The management of destabilising loads*. Retrieved maart 30, 2023, from NSC - Technical.
- [3] Dlubal Software. (z.d.). RFEM 6 | FEM Structural Analysis Software versie 6.02. *RFE*. Retrieved april 14, 2023, from <https://www.dlubal.com/en/products/rfem-fea-software/what-is-rfem>
- [4] European Committee for Standardisation. (2005). *BS EN 1993-1-1 Eurocode 3. Design of steel structures - General rules and rules for buildings*. Brussel, groot britannië: CEN. Retrieved januari 14, 2023, from <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1993.1.1.2005.pdf>
- [5] Hartsuijker, C., & Welleman, H. (2018). *Module: Spanningsleer en bezwijkmodellen*. Delft: TU Delft - Civiele techniek. Retrieved april 14, 2023
- [6] Horikx, M. P. (2019). *Staalconstructies Theorie*. Retrieved 10 01, 2022, from Brightspace HVA: <https://dlo.mijnhva.nl/d2l/le/content/73101/viewContent/247600/View>
- [7] Jeurdink, A., Joordens, G., Coenen, G., Hendriks, L., Rekers, M., Saadon, N., . . . van Kleunen, J. (2022). *Tijdelijke constructies voor het ondersteunen van bekistingen - versie 2.0*. Gouda: Stubeco. Retrieved april 14, 2023, from https://www.stubeco.nl/assets/images/files/Do7_2_Tijdelijke_constructies_voor_het_ondersteunen_van_bekistingen_2.pdf
- [8] Kindmann, R. (2021). *Stahlbau Teil 2: Stabilität und Theorie 2. Ordnung*. Berlijn: Ernst & Sohn. Retrieved maart 30, 2023
- [9] Knobloch, M., & Kuhlmann, U. (2020). *Biegedrillknicken als Knicken des Druckgurtes konsistenter Nachweis für geschweißte Träger im Kalt und Warmzustand*. Bochum: Ruhr-Universität Bochum. Retrieved januari 13, 2022
- [10] Raven, W. (2006). *Nieuwe blik op kip en knik*. Ede: Technische Universiteit Delft. Retrieved mei 2, 2023
- [11] Schaper, L., Jörg, F., Winkler, R., Kuhlman, U., & Knobloch, M. (2019). *The simplified method of the equivalent compression flange*. Steel Construction. Retrieved oktober 31, 2022
- [12] Staalsupport. (z.d.). *Vraag en antwoord*. Retrieved april 14, 2023, from Staalsupport: <https://www.staalsupport.nl/zoeken-detail.asp?pag=303>
- [13] Steenbergen, H., Bijlaard, F., & Snijder, H. (2022). *Stabiliteit*. Zoetermeer: Bouwen met staal. Retrieved januari 31, 2023
- [14] Stichting Koninklijk Nederlands Normalisatie Instituut. (2011). *NEN-EN 1993-1-5:2006+A1:2017+NB:2011 Staal - Constructieve plaatvelden*. NEN. Retrieved augustus 8, 2022, from <https://www.briswarenhuis.nl/docs/norm/nen-en1993-1-5-2006>

- [15] Stichting Koninklijk Nederlands Normalisatie Instituut. (2016a). *NEN-EN 1993-1-1:2006+A1:2014+NB:2016 Staal - Algemene Regels*. Delft: NEN. Retrieved september 30, 2022, from <https://www.briswarenhuis.nl/docs/norm/nen-en1993-1-1-2006>
- [16] Tomás, J., Nseir, J., Camotim, D., & Boissonnade, N. (2013). *Stability, Failure and Design of I-section Steel Beams Subjected to Tension*. St. Louis: Structural Stability Research Council.
- [17] Trahair, N. (1993). *Flexural-Torsional Buckling of Structures*. Boca Raton: CRC Press Inc. Retrieved april 4, 2023
- [18] van Splunter, M. (2022). *Plooistabiliteit van open stalen buispalen in gedraineerde grondlagen*. Terheijden: BV/BMS. Retrieved april 14, 2023, from <https://www.bvbms.nl/images/Afstudeerrapporten/2022.2118%20splunter%20van%20%20afstudeerrapport%20bvbms.pdf>



Bijlages

- Bijlage 1:** Literatuuronderzoek kipstabiliteit
- Bijlage 2:** Handberekening vergelijking toetsingsmethoden kipstabiliteit
- Bijlage 3:** Grafieken en tabellen vergelijking toetsingsmethoden kipstabiliteit
- Bijlage 4:** Tabellen GNA & GMNIA's
- Bijlage 5:** Grafieken GMNIA's
- Bijlage 6:** Uitvoer GNA's RFEM
- Bijlage 7:** Uitvoer GMNIA's RFEM
- Bijlage 8:** Nomogram vereenvoudigde toetsingsmethode
- Bijlage 9** Grafieken invloed axiale trekkracht