

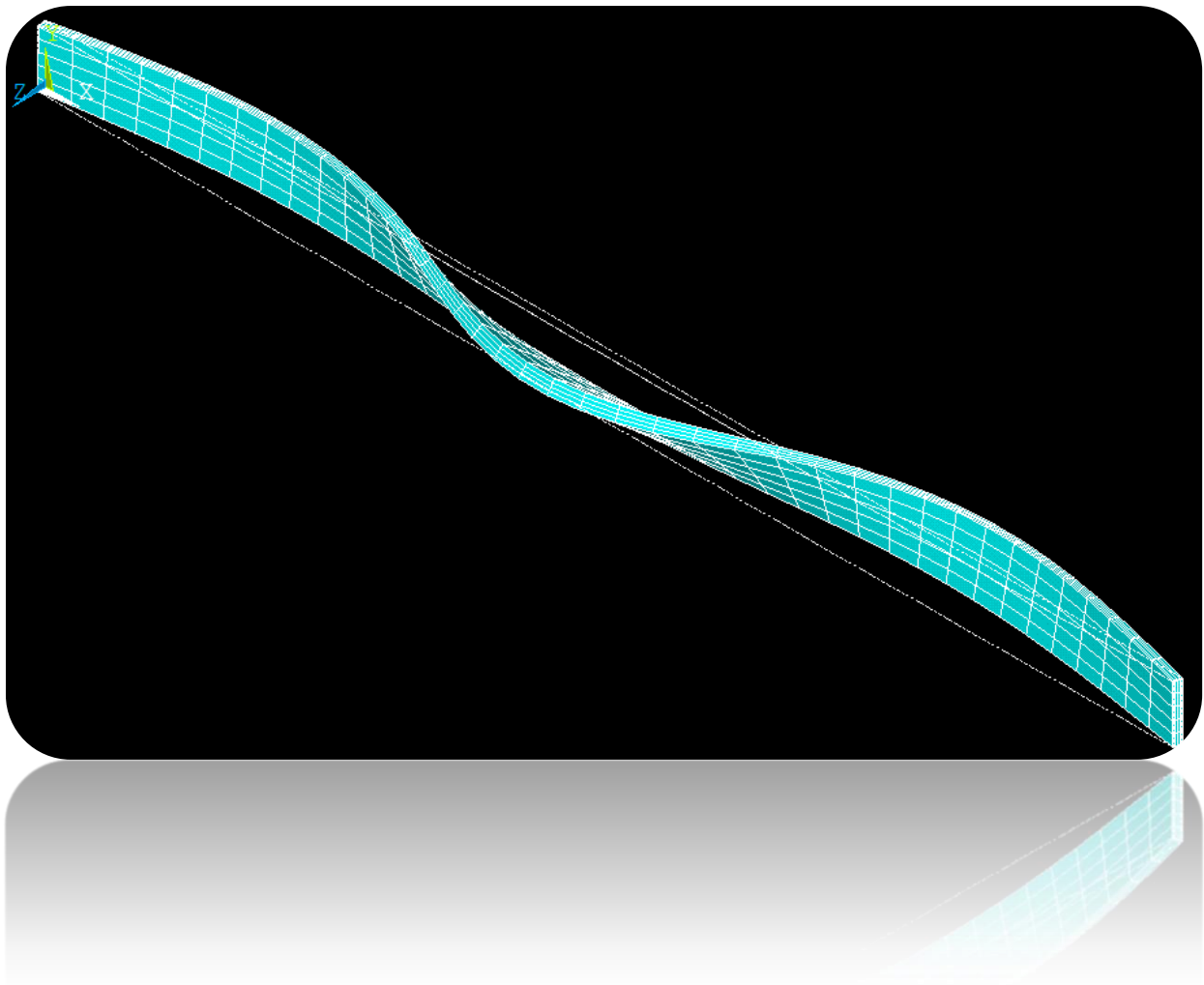
2013

TU Delft

Stan Reinders
4079809

1^e begeleider:
Ir. G.J.P. Ravenshorst

2^e begeleider:
Ir. P.C.J. Hoogenboom



EINDRAPPORT – DE EFFECTIEVE KIPLENGTE VAN HOUTEN LIGGERS

Een onderzoek naar de invloed van specifieke ondersteuningssituaties op de effectieve kiplengte van houten liggers

VOORWOORD

Voor u ligt het eindrapport van het bachelor eindwerk over de effectieve kiplengte van houten liggers, gemaakt door Stan Reinders. In dit rapport worden de resultaten weergegeven van het onderzoek naar de invloed van specifieke ondersteuningssituaties op het kipgedrag van houten liggers. De voornaamste onderwerpen in dit verslag zijn het omgaan met kipgedrag in de bestaande normen, het onderzoeken van kipgedrag met behulp van eindige elementen software en het verwerken van de resultaten van dit onderzoek tot bruikbare formules.

Graag wil ik mijn begeleiders Ir. G.J.P. Ravenshorst en Dr. Ir. P.C.J. Hoogenboom bedanken voor hun begeleiding bij de uitvoering van dit Bachelor eindproject.

Delft, juni 2013

Stan Reinders

INHOUDSOPGAVE

Voorwoord	2
Defenities	5
Assenstelsel	5
Symbolen.....	5
1. Inleiding	6
Doelstelling	6
Onderzoeksvraag	6
Algemeen	7
Normen	8
ANSYS	8
Theorie	9
2. Norm onderzoek	11
Huidige situatie: Eurocode 5, hout.....	11
Conclusies met betrekking tot de onderzoeksvragen	12
Eurocode 3, staal.....	14
Kipsteunen.....	16
Toepasbaarheid Eurocode 3 op hout	16
Oude Nederlandse norm, NEN 6760	18
Zijdelings gesteunde liggers	19
Samenvatting norm onderzoek.....	20
3. Simulatie & onderzoek	21
Effect onvolledige kipsteun	21
Omschrijving	21
Model in ANSYS	21
Verwerking resultaten	23
Vergelijking kipsteun met gaffeloplegging.....	28
Effect stijfheid kipsteun	30
Omschrijving	30
Model in ANSYS	32
Verwerking resultaten	33
Effect stijfheid gaffeloplegging	34
Omschrijving	34

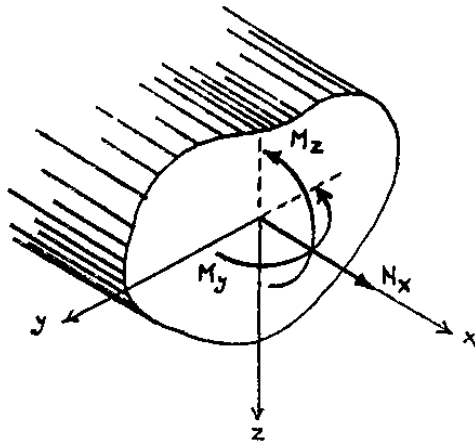
Model in ANSYS	34
Verwerking resultaten.	35
4. Conclusies en Aanbevelingen voor de praktijk.....	37
Norm onderzoek	37
Simulatie & onderzoek.....	37
5. Aanbevelingen voor vervolgonderzoek	39
Nawoord.....	40
Bronvermelding.....	41
Bijlagen	42
Bijlage 1: Toepasbaarheid Eurocode 3.....	42
Bijlage 2: Code ANSYS onvolledige kipsteun.....	44
Bijlage 3: Code ANSYS verende onvolledige kipsteun	47
Bijlage 4: Code ANSYS rotatiestijfheid opleggingen.....	50

DEFENITIES

In dit rapport zullen regelmatig dezelfde symbolen, begrippen en assenstelsels gebruikt worden. Deze worden hier gedefinieerd.

ASSENSTELSEL

Het lokale assenstelsel voor de liggers die onderzocht gaan worden worden als volgt gedefinieerd:



FIGUUR 1: LOKALE RICHTINGEN LIGGERDOORSNEDE [1]

Zoals in figuur 1 te zien is wordt de x-as genomen als de liggeras. De verticale richting wordt de z-as met de positieve richting naar beneden, en de horizontale richting loodrecht op de x-as wordt de y-as. Verder zijn de momenten zo genomen dat er bij een positief moment trek optreedt in de positieve asrichting.

SYMBOLLEN

l_{ef} : De parameter waar het allemaal om draait in dit verslag: de effectieve kiplengte. Dit is een lengte die volgt uit een specifieke belasting- en ondersteuningssituatie en de werkelijke afstand tussen twee opleggingen en/of gaffels. Door toepassing van deze lengte wordt kipinstabiliteit voor een specifieke situatie gekoppeld aan kipinstabiliteit voor een standaardsituatie.

M_{crit} : Het theoretisch kipmoment

E : De elasticiteitsmodulus

A : Doorsnede oppervlak van de ligger

I_z : Het traagheidsmoment om de zwakke as: $\frac{1}{12} \times h \times b^3$

I_y : Het traagheidsmoment om de sterke as: $\frac{1}{12} \times b \times h^3$

I_t : Het torsie traagheidsmoment $\frac{1}{3} \times b \times h^3 \times (1 - 0.63 \frac{b}{h})$, voor $b < \frac{h}{2}$

G : De afschuivingsmodulus

k_{crit} : Instabiliteitsfactor zoals gegeven in Eurocode 5

$\sigma_{m,crit}$: Kritische buigspanning. De buigspanning waarbij instabiliteit optreedt uitgaande van 5-percentielstijfheidswaarden

1. INLEIDING

Voor het berekenen van de stabiliteit van houten liggers zijn formules beschikbaar. In de formules die in de huidige norm voor hout staan wordt niet aangegeven hoe er rekening kan worden gehouden met kipstabiliteit in het geval van liggers die enkel in de druk- of trekzone worden ondersteunt. Om tot meer inzicht in dit onderwerp te komen zal bekeken worden óf en hoe hier rekening mee wordt gehouden in de verschillende normen. Ook wordt er in de huidige hout norm niet aangegeven hoe er om wordt gegaan met verende kipsteunen en opleggingen. Hier zal ook naar worden gekeken. Verder zullen er simulaties worden gedaan met behulp van het eindige-elementenprogramma ANSYS, om tot meer inzicht in het kipgedrag van deze houten liggers te komen.

DOELSTELLING

Het doel van dit eindwerk is het vinden van een wetmatigheid in de kipstabiliteit van onvolledig tegen kip ondersteunde houten liggers met een rechthoekige doorsnede en het in kaart brengen van deze wetmatigheid door het gebruik van een effectieve kiplengte. Met 'onvolledig tegen kip gesteund' wordt hier bedoeld dat één of meerdere van de in figuur 2 aangegeven ondersteuning ontbreekt of verend is uitgevoerd.

ONDERZOEKSVRAAG

De onderzoeksvraag die centraal staat is opgedeeld in een hoofdvraag met meerdere deelvragen. De hoofdvraag luidt als volgt:

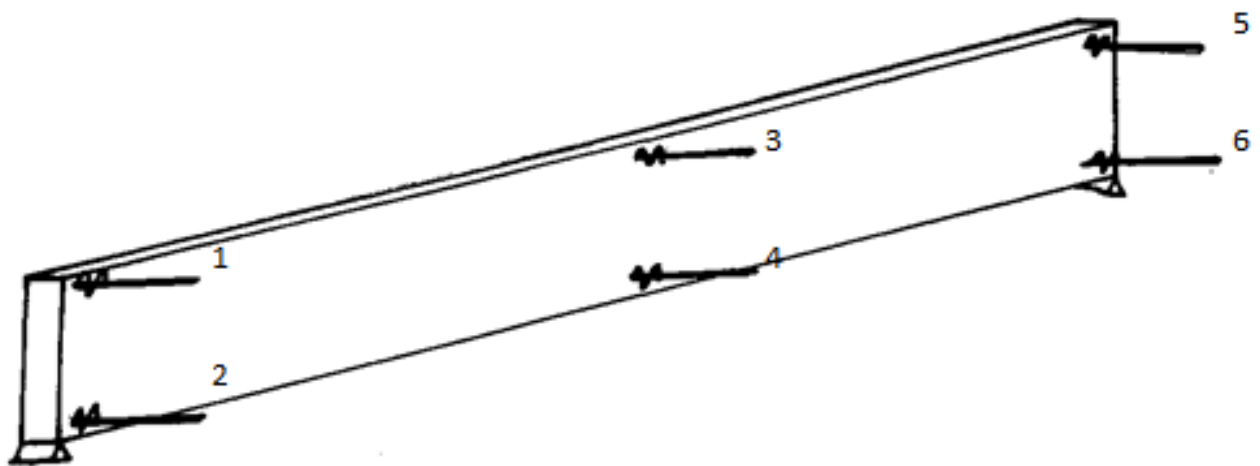
Wat is de invloed van onvolledige ondersteuning en kipsteunen op de effectieve kiplengte van houten liggers met een rechthoekige doorsnede?

De deelvragen hier bij horen zijn:

Wat is de invloed van kipsteunen die slechts één punt van de ligger ondersteunen op de effectieve kiplengte van deze ligger? (ondersteuning nummer 1, 2, 5 en 6 stijf uitgevoerd in combinatie met ondersteuning nummer 3 óf 4 stijf uitgevoerd waarbij er ook meerdere van deze ondersteuning gelijk over de ligger verdeeld kunnen zijn. Zie figuur 2)

Wat is de invloed van de stijfheid van deze kipsteunen op de effectieve kiplengte van deze ligger? (ondersteuning nummer 1, 2, 5 en 6 stijf uitgevoerd in combinatie met ondersteuning nummer 3 óf 4 verend uitgevoerd waarbij er ook meerdere van deze ondersteuning gelijk over de ligger verdeeld kunnen zijn. Zie figuur 2)

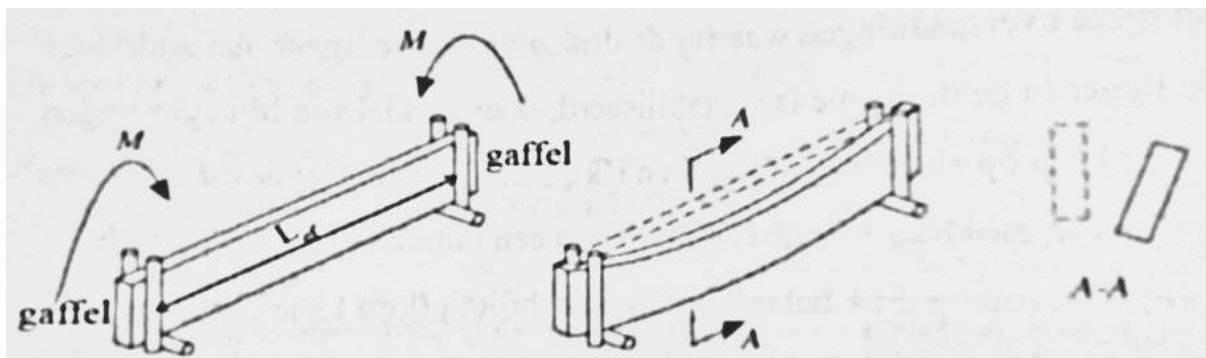
Wat is de invloed van de stijfheid van de gaffelopleggingen op de effectieve kiplengte van deze ligger? (ondersteuning nummer 1, 2, 5 en 6 aanwezig maar verend uitgevoerd. Ondersteuning nummer 3 en 4 afwezig. Zie figuur 2)



FIGUUR 2: ILLUSTRATIE BETEKENIS STEUNEN EN OPLEGGINGEN

ALGEMEEN

Een ligger belast op buiging zal een bepaalde kromming krijgen, wat resulteert in een bepaalde doorbuiging in de richting van deze belasting. Omdat een ligger echter nooit helemaal recht is zal deze verplaatsing niet altijd alleen maar in de belastingsrichting plaats vinden. Wanneer een kleine verandering van het moment veroorzaakt door een verticale belasting een grote horizontale verplaatsing van de ligger tot gevolg heeft noemen we dit kipinstabiliteit. Om dit verschijnsel tegen te gaan kunnen er kipsteunen worden aangebracht welke voorkomen dat de ligger in zijdelingse richting kan uitbuigen, of om zijn eigen as kan roteren. Beide aanpassingen kunnen een grotere momentcapaciteit tot gevolg hebben.



FIGUUR 3: ZIJDELINGSE VERPLAATSING DOOR MOMENT OM STERKSTE AS [3]

Om voor specifieke situaties te toetsen of de ligger stabiel zal blijven, worden deze situaties vergeleken met een standaardsituatie, waarin een ligger met lengte l belast wordt door een constant veldmoment ter grootte van M_0 . De ligger in deze standaardsituatie is opgelegd op twee gaffelopleggingen welke alle verplaatsingen in y- en z-richting verhinderen. Verder voorkomt een van deze gaffelopleggingen ook de verplaatsing in de x-richting. Beide gaffelopleggingen zorgen dat de ligger niet om de x-as kan roteren. Dit basisgeval is te zien in figuur 3. Te zien is dat voor dit standaardgeval de lengte van de ligger gelijk is aan l_{ef} .

NORMEN

In de Eurocode 5, de huidige norm, en de TGB, de oude norm, wordt dit relateren van specifieke gevallen naar een basisgeval op verschillende manieren gedaan.

Er zal naar deze normen gekeken worden om te bepalen welke factoren van belang zijn, en hoe de kipstabiliteit in rekening moet worden gebracht.

Verder zal er ook gekeken worden naar de huidige staal normen om te kijken of hier bruikbare gegevens uit af te leiden zijn.

ANSYS

In dit project zullen de kritische kiplmomenten bepaald worden door einidige-elementen simulaties uit te voeren met behulp van het programma ANSYS. In dit programma wordt de te onderzoeken ligger opgedeeld in kleinere elementen waardoor de spanningen en verplaatsingen op ieder punt in de ligger benaderd kunnen worden. Uit deze gegevens kan vervolgens het kiplmoment gevonden worden bij specifieke belastinggevallen op liggers met specifieke randvoorwaarden. Uit deze specifieke situaties zal een algemene trend geïsoleerd moeten worden.

THEORIE

Met behulp van evenwichtsvergelijkingen hebben Timoshenko en Gere [3] differentiaalvergelijkingen opgesteld, welke ze hebben opgelost met randvoorwaarden behorende bij de situatie in figuur 3. Hiermee hebben zij een formule opgesteld voor het kritische kiplmoment:

$$M_{crit} = \frac{\pi}{l} \sqrt{\frac{EI_z GI_t}{1 - \frac{I_z}{I_y}}}$$

In deze formule is:

M_{crit} : Het theoretisch kiplmoment

E : De elasticiteitsmodulus

I_z : Het traagheidsmoment om de zwakke as $\frac{1}{12} \times h \times b^3$

I_y : Het traagheidsmoment om de sterke as $\frac{1}{12} \times b \times h^3$

I_t : Het torsie traagheidsmoment $\frac{1}{3} \times b \times h^3 \times (1 - 0.63 \frac{b}{h})$, voor $b < \frac{h}{2}$

G : De afschuivingsmodulus

l : De lengte van de ligger behorende bij het basisgeval weergegeven in figuur 3

Verder hebben Timoshenko en Gere bedacht dat situaties anders dan het basisgeval in rekening kunnen worden gebracht door l aan te passen. De nieuwe lengte noemen zij de effectieve lengte (l_{eff}). Als l_{eff} groter wordt heeft dit een negatief effect op M_{crit} .

l_{eff} wordt gevonden door de daadwerkelijke lengte van de ligger te vermenigvuldigen met een factor voor de momentverdeling (1 voor constant moment, 0,9 voor een verdeelde belasting, 0,8 voor een puntlast halverwege de overspanning). In deze gevallen is l_{eff} dus kleiner dan in het basisgeval, wat resulteert in een grotere waarde voor M_{crit} . Dit komt doordat bij een constant moment het maximale moment over de gehele liggerlengte aanwezig is, wat resulteert in het eerder optreden van instabiliteit.

Vervolgens wordt bij deze l_{eff} een waarde opgeteld voor het aangrijppingspunt van de belasting. Deze waarde is afhankelijk van de liggerhoogte h (0 voor aangrijppen in de zwaartelij, $+2 \times h$ in of boven de drukzone, $-\frac{h}{2}$ in of onder de trekzone).



FIGUUR 4: EFFECT AANGRIJPINGSPOINT BELASTING OP EFFECTIEVE KIPLENGTE

Deze correctie volgt uit het feit dat een last boven de neutrale lijn van de ligger bij een kleine hoekverdraaiing een moment veroorzaakt wat deze kleine hoekverdraaiing versterkt.

Een last in de trekzone veroorzaakt echter een moment in tegengestelde richting van de hoekverdraaiing. Heeft dus een stabiliserend effect. Figuur 4 dient ter verduidelijking van dit effect. Een last in de drukzone is dus ongunstig en zal een grotere l_{eff} vereisen. Een last in de trekzone is gunstig, waardoor volstaan kan worden met een kleinere waarde voor l_{eff} .

Verder geldt dat indien er kipsteunen in de vorm van gaffels op de ligger aanwezig zijn de afstand l gereduceerd mag worden tot de afstand tussen twee van deze gaffels. Dit geldt alleen indien deze kipsteunen als gaffels beschouwd mogen worden en dus alle rotatie om de x-as voorkomen. In het verslag van Roeland van Straten [7] wordt nauwkeuriger ingegaan op hoe er met een dergelijke situatie om kan worden gegaan.

2. NORM ONDERZOEK

In de huidige Eurocode 5 [5] voor hout wordt enkel gegeven hoe de effectieve kiplengte wordt beïnvloed door een kipsteun die als volledige gaffel werkt. Er wordt niet ingegaan op een steun die enkel de gedrukte zijde van de ligger ondersteunt. Voor staal zijn er echter wel regels opgenomen in de Eurocode 3 [4] die dit in beschouwing nemen. Ook stonden in de oude Nederlandse norm, de NEN 6760 [6] regels over hoe men hiermee om moest gaan. In dit gedeelte worden elk van de drie normen behandeld en wordt toegelicht hoe kip in rekening wordt gebracht. Verder wordt toegelicht of dit toepasbaar is op onvolledig tegen kip gesteunde houten liggers.

HUIDIGE SITUATIE: EUROCODE 5, HOUT

In de huidige situatie worden houten liggers getoetst op stabiliteit volgens 6.3.3 uit Eurocode 5. In dit gedeelte wordt hiervan een samenvatting gegeven.

Uitgaande van enkel een moment om de y-as moet er voldaan worden aan de volgende eis:

$$\sigma_{m,d} \leq k_{crit} \times f_{m,d}$$

Hier is het vooral interessant hoe k_{crit} wordt bepaald, omdat dit de factor is die de buigsterkte reduceert om kip in rekening te brengen. k_{crit} wordt in de Eurocode 5 als volgt gedefinieerd:

$$\text{Voor } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \quad k_{crit} = 1$$

$$\text{Voor } 0,75 \leq \lambda_{rel,m} \leq 1,4 \quad k_{crit} = 1,56 - 0,75\lambda_{rel,m}$$

$$\text{Voor } 1,4 \leq \lambda_{rel,m} \quad k_{crit} = \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2}$$

Hierin is $\lambda_{rel,m}$ het volgende:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}}$$

$\sigma_{m,crit}$ is hiering de kritische buigspanning volgens de klassieke stabiliteitstheorie gebruik makend van de 5-percentielstijfheidswaarden:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{\pi \sqrt{E_{0,05} I_z G_{0,05} I_{tor}}}{l_{ef} W_y}$$

Hierin is alleen l_{ef} afhankelijk van de overspanning. Voor een aantal standaard gevallen zijn de verhoudingen $\frac{l_{ef}}{l}$ gegeven in tabel 1. Voor l kan in het geval van een zijdelings gesteunde ligger, volgens collegedictaat CT2052 [3], ook de ongesteunde

afstand genomen worden. Dit mag echter alleen gedaan worden als de kipsteunen als volledige gaffels kunnen worden gezien.

Verder wordt er in tabel 1 ook rekening gehouden met het aangrijpingspunt van de belasting. Indien de belasting aangrijpt ter hoogte van het zwaartepunt van de balk kan de effectieve kiplengte gewoon bepaald worden volgens $\frac{l_{ef}}{l}$.

Als de belasting boven het zwaartepunt van de balk aangrijpt heeft dit een negatieve invloed op het de kritische kipspanning en moet de effectieve kiplengte vergroot worden met $2 \times h$ waarbij h de hoogte van de balk is.

Een belasting die aangrijpt onder het zwaartepunt van de balk heeft in tegenstelling hierop een positieve invloed op de kritische kipspanning. Dit mag in rekening gebracht worden door de effectieve kiplengte te verminderen met $\frac{h}{2}$.

Balktype	Belastingtype	$\frac{l_{ef}}{l}$ ^a
Op twee steunpunten	Constant moment	1,0
	Gelijkmatig verdeelde belasting	0,9
	Puntlast in het midden van de overspanning	0,8
In overkraging	Gelijkmatig verdeelde belasting	0,5
	Puntlast op het niet-ondersteunde uiteinde van de balk	0,8
^a De verhouding tussen de meewerkende lengte l_{ef} en de overspanning l is geldig voor een balk met torsiestijve (gaffel-) opleggingen en belast in het zwaartepunt. Indien de last is toegepast aan de drukzijde van de balk dan behoort l_{ef} te zijn vermeerderd met $2h$ en voor een last aan de trekzijde van de balk kan l_{ef} worden verminderd met $0,5h$.		

TABEL 1: EFFECTIEVE KIPLENGTE VOLGENS TABEL 6.1 EUROCODE 5[5]

CONCLUSIES MET BETREKKING TOT DE ONDERZOEKSVRAGEN

In Eurocode 5 worden een aantal standaardsituaties beschreven. Roeland van Straten heeft in zijn verslag [7] een uitbreiding op de eurocode gegeven voor een aantal gevallen die niet in de eurocode voorkomen. Er zijn echter nog een aantal zaken niet toegelicht, welke dit verslag zal proberen te verduidelijken.

Voor situaties waarin de kipsteunen geen volledige gaffels zijn, maar slechts de gedrukte zijde van de ligger ondersteunen, worden in de Eurocode 5 geen regels gegeven. Verder wordt er niets verteld over de invloed van de stijfheid van deze kipsteunen op de effectieve kiplengte. Ook worden er geen regels gegeven voor situaties waarin de opleggingen niet als volledige gaffels gezien kunnen worden, maar enige vorm van rotatie toelaten.

Wat wel beschreven is, is een formule voor de kritische kipspanning als functie van de doorsnede grootheden, materiaal eigenschappen en de effectieve kiplengte. Uit de gedraait zullen gaan worden, zal enkel een last komen waarbij de constructie zal gaan kippen. Hieruit kan een kipmoment worden berekend, maar hiermee is er nog geen effectieve kiplengte bepaald. Een formule voor de effectieve kiplengte wordt dus uit de formule voor de kritische kipspanning bepaald:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{\pi \sqrt{E_{0,05} I_z G_{0,05} I_{tor}}}{l_{ef} W_y}$$

Hieruit volgt:

$$l_{ef} = \frac{\pi \sqrt{E_{0,05} I_z G_{0,05} I_{tor}}}{W_y \sigma_{m,crit}} \text{ of:}$$

$$l_{ef} = \frac{\pi \sqrt{E_{0,05} I_z G_{0,05} I_{tor}}}{M_{y,crit}}$$

Deze waarde is anders dan de waarde die uit de formule van Timoshenko en Gere volgt, omdat de formule uit de Eurocode een vereenvoudiging hiervan is. Omdat in het algemeen volgens de Eurocode wordt gerekend zal deze formule in dit verslag gebruikt worden om de effectieve kiplengte te bepalen.

EUROCODE 3, STAAL

Staal is een heel ander materiaal dan hout. Toch zijn er in de manier van rekenen met staal veel overeenkomsten met de manier van rekenen in hout. Het kan dus nuttig te zijn om te kijken naar de regels die voor stalen constructies worden toegepast, om tot regels voor houten constructies te komen.

De kipweerstand in staal wordt in Eurocode 3 gecontroleerd door de volgende unity check uit te voeren.

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0$$

Waarbij:

$$M_{b,Rd} = \chi_{Lt} W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

Hierin is χ_{Lt} een factor die het maximale moment reduceert voor kipstabiliteit. Hier zullen we dus nader naar moeten kijken. Deze factor wordt bepaald op basis van de relatieve slankheid λ_{LT} volgens de volgende formule:

$$\chi_{Lt} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \lambda_{LT}^2}} \quad \text{waarbij } \chi_{Lt} \leq 1,0$$

Waarin:

$$\phi_{LT} = 0,5[1 + \alpha_{LT}(\lambda_{LT} - 0,2) + \lambda_{LT}^2]$$

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

Waarin M_{cr} het kritieke elastische kipmoment is.

Verder is α_{LT} de imperfectiefactor die gevonden wordt op basis van het gebruikte type profiel. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van tabel 2 en 3.

Kipkromme	a	b	c	d
Imperfectiefactor α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76

TABEL 2: AANBEVOLEN IMPERFECTIEFACTOR VOOR GEGEVEN KIPKROMME VOLGENS TABEL 6.3 EUROCODE 3 [4]

Doorsnede	Begrenzing	Kipkromme
Gewalste I-profielen	$h/b \leq 2$	a
	$h/b > 2$	b
Gelaste I-profielen	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d
Andere doorsneden	–	d

TABEL 3: AANBEVOLEN KIPKROMMEN VOOR GEGEVEN DOORSNEDE VOLGENS TABEL 6.4 UIT EUROCODE 3[4]

De gevonden χ_{Lt} moet aangepast worden op basis van de momentenverdeling over de balk volgens:

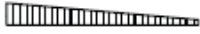
$$\chi_{Lt,mod} = \frac{\chi_{Lt}}{f} \quad \text{Waarbij } \chi_{Lt,mod} \leq 1 \text{ en}$$

$$\chi_{Lt,mod} \leq \frac{1}{\lambda_{LT}^2}$$

De gebruikte f in deze functie volgt uit:

$$f = 1 - 0,5(1 - k_c)[1 - 2,0(\lambda_{LT} - 0,8)^2] \text{ Met } f \leq 1,0$$

k_c is hierbij een correctiefactor die op basis van de momentenverdeling gevonden kan worden in tabel 4.

Momentenverdeling	k_c
 $\psi = 1$	1,0
 $-1 \leq \psi \leq 1$	$\frac{1}{1,33 - 0,33\psi}$
	0,94
	0,90
	0,91
	0,86
	0,77
	0,82

TABEL 4: CORRECTIEFACTOREN k_c VOLGENS TABEL 6.6 UIT EUROCODE 3[4]

KIPSTEUNEN

Om het gebruik van kipsteunen mee te nemen wordt gekeken naar de situatie waarin de op druk belaste flens zijdelings gesteund wordt op een onderlinge afstand L_c . De ondersteuning tegen kip is voldoende als aan het volgende voldaan is:

$$\lambda_f = \frac{k_c L_c}{i_{f,z} \lambda_1} \leq \lambda_{c0} \frac{M_{c,Rd}}{M_{y,Ed}}$$

Hierin zijn:

$M_{y,Ed}$ = de rekenwaarde van het maximale buigend moment tussen de beschouwde steunen;

$$M_{c,Rd} = W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}};$$

W_y = het weerstandsmoment om de sterke as van de gesteunde flens;

k_c = de slankheidscorrectiefactor voor de momentverdeling tussen de beschouwde steunen volgens tabel 4;

$i_{f,z}$ = de traagheidsstraal van de equivalente op druk belaste flens samengesteld uit de op druk belaste flens en 1/3 van het gedrukte deel van de lijfoppervlakte om de zwakke as van het profiel;

λ_{c0} = een relatieveslankheidslimiet voor de hierboven gedefinieerde equivalente op druk belaste flens;

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,3\varepsilon$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

TOEPASBAARHEID EUROCODE 3 OP HOUT

Om de onderzoeksvragen te kunnen beantwoorden is voornamelijk de laatste formule die hier gegeven is van belang, omdat deze de toepassing van kipsteunen in rekening brengt. Deze formule gaat ervan uit dat het optreden van kip wordt verhinderd door de flensbuiging. Omdat er wordt gekeken naar houten liggers met een rechthoekige doorsnede, zullen er geen flenzen aanwezig zijn die kip voorkomen door buiging om hun sterke as. In bijlage 1 wordt bekeken wat er met de maximale L_c voor een T-ligger gebeurt, wanneer de breedte van de gesteunde flens even breed wordt als de dikte van het lijf. Dit is bekeken voor staal (S235) en hout (GL24H). De resultaten hiervan zijn in tabel 5 weergegeven.

b[mm]	L _{c,max,staal} [mm]	L _{c,max,hout} [mm]
500	1,38E+04	8,71E+03
450	9,97E+03	6,32E+03
400	6,96E+03	4,41E+03
350	4,62E+03	2,92E+03
300	2,87E+03	1,82E+03
250	1,64E+03	1,04E+03
200	8,19E+02	5,18E+02
150	3,34E+02	2,12E+02
100	9,61E+01	6,09E+01
50	1,42E+01	8,97E+00

TABEL 5: L_{C,MAX} VOOR SMALLER WORDENDE FLENS

Uit de formule is af te leiden dat als $i_{fz} \rightarrow 0$, $L_{c,max} \rightarrow 0$. Indien er dus géén flens meer is, is de lengte waarover geen steunen nodig zijn om kip te voorkomen gelijk aan 0. Echter wordt een rechthoekige doorsnede niet gezien als het ontbreken van een flens. Er wordt in dit geval gerekend met een flens die dezelfde dikte heeft als het lijf. In deze formule wordt er vanuit gegaan dat kip wordt voorkomen door buiging van de flens (normaalkrachten in de flensdoorsnede). Als we de formule in Eurocode 5 en de formule van Timoshenko en Gere bekijken blijkt dit niet de meest belangrijke factor te zijn.

$$\sigma_{m,crit} = \frac{\pi \sqrt{E_{0,05} I_z G_{0,05} I_{tor}}}{l_{ef} W_y} \quad \text{En} \quad M_{crit} = \frac{\pi}{l_{ef}} \sqrt{\frac{E I_z G I_t}{1 - \frac{I_z}{I_y}}}$$

Volgens bovenstaande formules is torsie (schuifspanningen in de doorsnede) ook belangrijk. Als er geen, of een heel smalle flens aanwezig is wordt torsie veel belangrijker dan de buigstijfheid om de zwakke as van het profiel. In de formule die voor staal geldt wordt er vanuit gegaan dat deze torsie te verwaarlozen is ten opzichte van de verhinderde flensbuiging. De formule voor staal is dus niet toe te passen op houten liggers met een rechthoekige doorsnede.

De waarden in de tabel zijn dus een onderschatting voor de werkelijke L_c . Dit geldt voornamelijk voor de L_c bij een kleine b . Wanneer de flensbreedte echter groter is, geeft deze formule wel een goede benadering voor de lengte L_c .

OUDE NEDERLANDSE NORM, NEN 6760

Bij het gebruik van de oude Nederlandse norm moet er getoetst worden dat de doorsnede voldoet aan het volgende:

$$\sigma_{m;0;d} \leq k_{ins} \times f_{m;0;d}$$

k_{ins} is hierin de factor die rekening houdt met kipinstabiliteit. Deze factor kan bepaald worden met 2 formules, afhankelijk van k_m :

$$k_m = \frac{\sigma_{m;cr}}{f_{m;0;rep} \times (1 + 0,1 \times \sqrt{\frac{\eta_z \times E_{0;u;rep}}{f_{m;0;rep}}})}$$

Met:

Voor gezaagd hout: $\eta_z = \frac{i_z}{300 \times r_z}$

Voor gelamineerd hout: $\eta_z = \frac{i_z}{500 \times r_z}$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}}$$

$$r_z = \frac{W_z}{A}$$

En:

$$\sigma_{m;cr} = \left(\frac{G_{ser;rep} \times I_{tor}}{-e \times E_{0;ser;rep} \times W_y} + \frac{\pi^2 \times C_w}{-e \times l_{buc}^2 \times W_y} \right) \times E_{0;u;rep}$$

Als k_m bepaald is kan vervolgens k_{ins} bepaald worden. Dit gebeurt bij $k_m \geq 1$ volgens:

$$k_{ins} = \frac{k_m \times (1 + 0,1 \times \sqrt{\eta_z \times \frac{E_{0;u;rep}}{f_{m;0;rep}}})}{k_m + \sqrt{0,5 \times k_{E;z} \times \eta_z \times \lambda_z \times \frac{f_{c;0;rep}}{f_{m;0;rep}}}}$$

En bij $k_m < 1$ volgens:

$$k_{ins} = \frac{k_m \times \left(1 + 0,1 \times \sqrt{\eta_z \times \frac{E_{0;u;rep}}{f_{m;0;rep}}} \right)}{1 + 0,5 \times (k_m + k_m^2) \times \sqrt{0,5 \times k_{E;z} \times \eta_z \times \lambda_z \times \frac{f_{c;0;rep}}{f_{m;0;rep}}}}$$

ZIJDELINGS GESTEUNDE LIGGERS

Voor zijdelings gesteunde liggers die enkel op buiging zijn belast, en welke dus niet belast zijn met een drukkracht in de richting van de liggeras, moet voldaan worden aan:

$$\frac{\sigma_{m;0;d}}{f_{m;0;d}} \leq 1$$

Dit is dezelfde vergelijking die geldt voor buiging, maar zonder de instabiliteitsfactor k_{ins} . Er wordt in deze situatie dus vanuit gegaan dat het materiaal bezwijkt voordat er kip op kan treden, en dat de afstand tussen de kipsteunen dus voldoende klein is. Hoe klein deze afstand maximaal mag zijn om het optreden van kip te voorkomen, wordt in de NEN 6760 niet gespecificeerd.

SAMENVATTING NORM ONDERZOEK

In Eurocode 5 wordt omschreven hoe de effectieve kiplengte bepaald kan worden uit het kritische kipmoment. Ook is te zien hoe dit gerelateerd kan worden naar de standaardsituatie.

Uit Eurocode 3 is afgeleid dat een stalen ligger waarvan enkel de bovenflens gesteund is tegen zijdelings uitbuigen, een andere situatie is dan een ligger met een rechthoekige doorsnede waarvan de bovenkant niet zijdelings uit kan buigen. De formule die voor staal gebruikt wordt kan dus niet voor houten liggers met een rechthoekige doorsnede toegepast worden.

In de oude Nederlandse norm, NEN6760, is een formule te vinden die geldt voor zijdelings gesteunde liggers. In deze formule wordt er echter van uit gegaan dat deze zijdelingse ondersteuning ervoor zorgen dat er géén kip meer op kan treden. Voor dit project is dit niet van belang. Wat van belang is voor dit project is het vinden voor welke waarde van de q -last er wél kip optreedt voor specifieke ondersteuningssituaties.

In de normen waar naar is gekeken is niets te vinden wat antwoord geeft op de onderzoeksvragen. Wel is er gevonden hoe de effectieve kiplengte die bepaald gaat worden in Eurocode 5 moet gaan passen.

3. SIMULATIE & ONDERZOEK

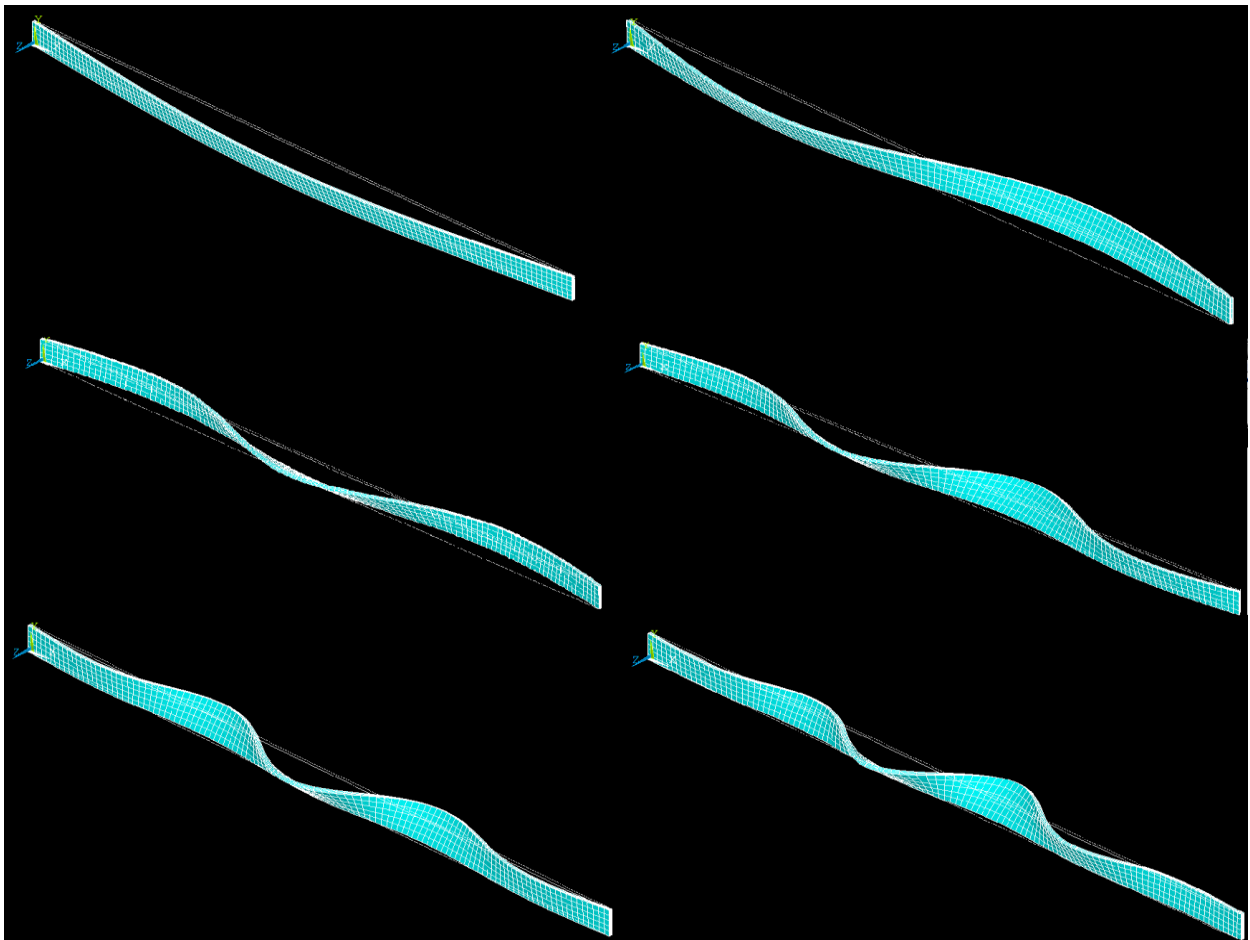
EFFECT ONVOLLEDIGE KIPSTEUN

OMSCHRIJVING

In het geval dat alleen de gedrukte- of getrokken zone van een ligger wordt ondersteund, kan dit gesteunde punt niet meer verplaatsen in de y-richting. De rest van de ligger kan dit echter nog wel. Ook kan de ligger nog roteren om dit gesteunde punt. Wat dit voor effect heeft op het kipgedrag van de ligger zal onderzocht worden met behulp van ANSYS.

MODEL IN ANSYS

In ANSYS is een model opgesteld wat een balk genereert met een bepaalde lengte, breedte en hoogte. Verder kan er gegeven worden hoeveel kipsteunen er op de ligger aanwezig zijn. Deze steunen zullen, gelijk verdeeld over de lengte, een punt aan de bovenzijde van de ligger verhinderen tot bewegen in de y-richting. Op deze ligger wordt vervolgens een q-last aangebracht. ANSYS bepaald voor welke waarde van de q-last deze balk zal gaan kippen. Hoe de eerste kipvormen er uit zien voor situaties met 0, 1, 2, 3, 4 en 5 kipsteunen aan de gedrukte zijde van de ligger is te zien in figuur 5.



FIGUUR 5: KIPVORM VOOR LIGGERS MET 0, 1, 2, 3, 4 EN 5 KIPSTEUNEN

Om een dataset van kiplasten te krijgen heeft ANSYS de kiplast van deze ligger bepaald voor alle combinaties van:

Lengtes tussen: 6.000mm en 30.000mm in stappen van 1.000mm
Hoogtes tussen: $\frac{l}{22}$ en $\frac{l}{15}$ in 10 gelijke stappen
Breedtes tussen: $\frac{h}{10}$ en $\frac{h}{20}$ in 10 gelijke stappen

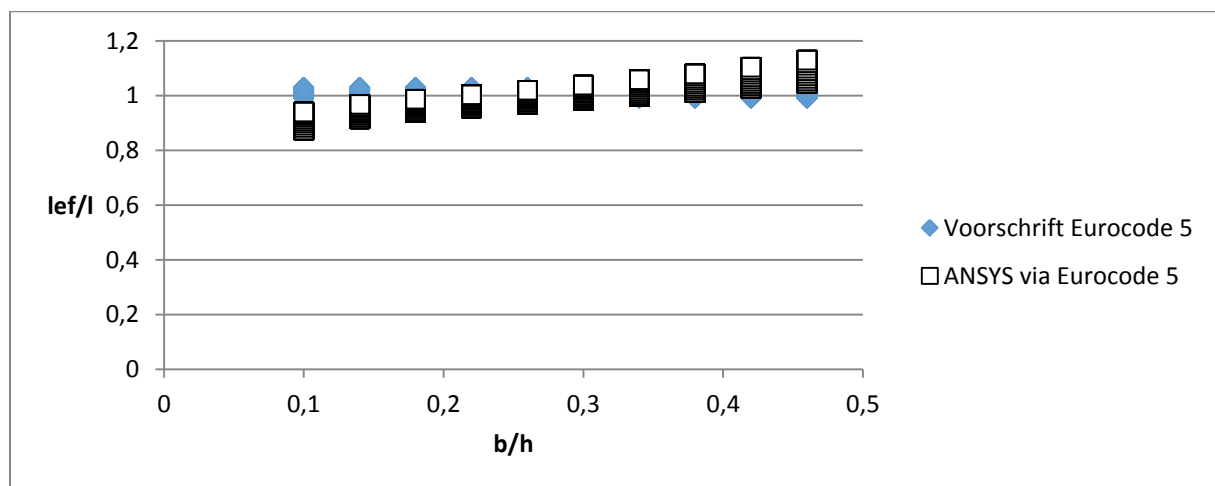
Al deze combinaties zijn bekeken voor situaties met 0, 1, 2, 4, 5 en 6 kipsteunen gelijk verdeeld over de lengte van de ligger.

De output die ANSYS geeft zijn 3 zogenaamde 'load multiplication factors' per situatie. Dit is een factor waarmee de belasting vermenigvuldigd moet worden om de kiplast te krijgen. De eerste load multiplication factor is de factor voor de maatgevende kiplast, en deze zal gebruikt worden om de effectieve kiplengte te bepalen. De tweede en derde load multiplication factor zijn factoren voor kipvormen welke bij hogere belastingen optreden. Deze zijn niet maatgevend en zullen dus verder niet bekeken worden.

De code om de kiplasten te bepalen voor verschillende lengten hoogten breedten en aantallen kipsteunen is te vinden in bijlage 2. Deze zelfde simulatie is ook uitgevoerd voor steunen welke de getrokken zijde van de ligger ondersteunen. Dit kan bijvoorbeeld interresant zijn voor situaties waarin windbelasting een rol speelt.

CONTROLE MODEL

Om te controleren of het model overeen komt met wat al bekend is, is voor een situatie zonder kipsteunen de verhouding $\frac{b}{h}$ geplot tegen $\frac{l_{ef}}{l}$. Dit is gedaan met de waarden die de huidige Eurocode 5 voorschrijft en met de resultaten uit het model waarbij gebruik is gemaakt van de formule afgeleid uit de eurocode 5.



GRAFIEK 1: VERGELIJKING EUROCODE MET ANSYS RESULTATEN

De minimale, maximale en gemiddelde waarden van $\frac{l_{ef}}{l}$ zijn gegeven in de volgende tabel.

	min	gem	max
$\frac{l_{ef}}{l}$ (theoretisch eurocode 5)	0,99	1,01	1,03
$\frac{l_{ef}}{l}$ (ANSYS via Eurocode 5)	0,87	1,00	1,13

TABEL 7: MINIMALE, MAXIMALE EN GEMIDDELDE WAARDEN $\frac{l_{ef}}{l}$

Ten eerste is te zien dat in ieder geval de orde van grootte overeen komt met wat de Eurocode voorschrijft. Indien dit niet zo zou zijn, zou het model niet kloppen. De spreiding in de resultaten is echter veel groter in het model dan de spreiding die de Eurocode 5 geeft. Dit is een gevolg van de simplificatie van de werkelijkheid die de Eurocode gebruikt. In de Eurocode is $\frac{l_{ef}}{l}$ alleen afhankelijk van de liggerhoogte, terwijl in het ANSYS model meerdere factoren worden meegenomen.

Verder is te zien dat voor $\frac{b}{h} < 0,25$ de Eurocode een hogere waarde geeft voor l_{ef} dan de waarde die mijn model geeft. Aangezien kipstabiliteit alleen maatgevend is voor slanke liggers, kan aangenomen worden dat alleen de waarden waarbij $\frac{b}{h} < 0,25$ van belang zijn. Omdat een grotere l_{ef} een kleiner kritisch kipmoment oplevert kan dus gezegd worden dat de waarde voor l_{ef} die de Eurocode geeft aan de conservatieve kant is.

VERWERKING RESULTATEN

Wat we uiteindelijk willen vinden is een multiplicatiefactor $\frac{l_{ef}}{l}$, waarmee de lengte vermenigvuldigd kan worden om een effectieve kiplengte te krijgen. Hiervoor zijn de minimale, gemiddelde en maximale waarden voor $\frac{l_{ef}}{l}$, die uit het model volgen, uitgezet tegen het aantal kipsteunen op de ligger. De waarden voor $\frac{l_{ef}}{l}$ zijn bepaald voor de standaardsituatie (constant moment over de gehele ligger, belasting grijpt aan in het normaalkrachten centrum van de doorsnede). Dit is als volgt gedaan voor steunen aan de gedrukte zijde:

$$\frac{l_{ef}}{l}(\text{standaardsituatie}) = \frac{(l_{ef, \text{simulatie}} - 2 \times h)}{0,9 l}$$

En voor steunen aan de getrokken zijde is dit gedaan volgens:

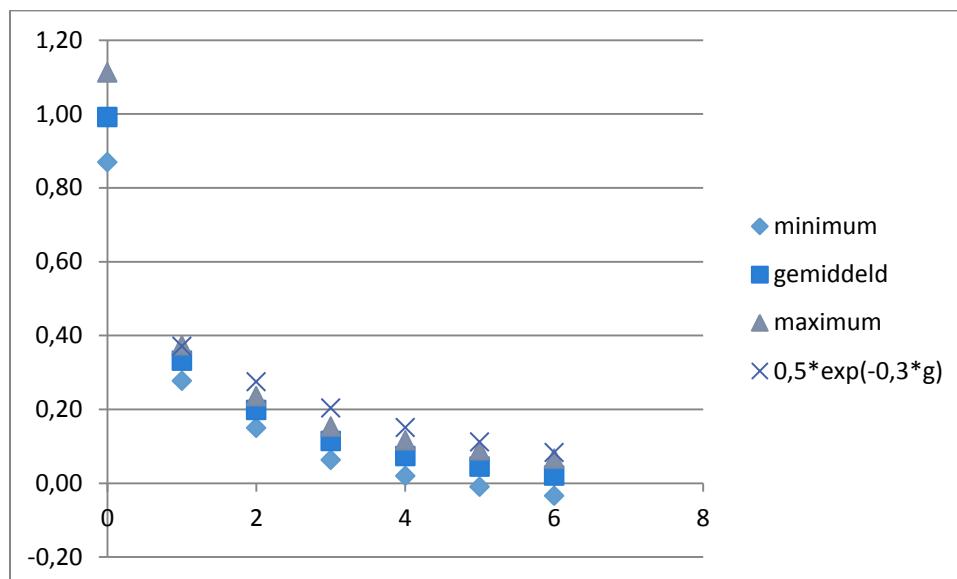
$$\frac{l_{ef}}{l}(\text{standaardsituatie}) = \frac{(l_{ef, \text{simulatie}} + \frac{h}{2})}{0,9 l}$$

Achteraf had dit beter al in het ANSYS model meegenomen kunnen worden. Hierover is een aantekening te vinden in het nawoord.

De minimale, gemiddelde en maximale waarde van $\frac{l_{ef}}{l}$ zijn vervolgens uitgezet tegen het aantal ondersteuning. Hierin is l de gehele liggerlengte. Ook is er een exponentiële benadering gemaakt voor de maximale waarden. Deze is middel de kruisjes weergegeven in de grafiek. Deze benaderen de maximale waarden voor $\frac{l_{ef}}{l}$, zodat deze altijd aan de veilige kant zit. Deze waarden zijn te zien in tabel 8 en grafiek 2 voor liggers ondersteund aan de gedrukte zijde.

$\frac{l_{ef}}{l}$	0	1	2	3	4	5	6
Minimum	0.87	0.28	0.15	0.06	0.02	-0.01	-0.03
Gemiddeld	0.99	0.33	0.20	0.11	0.07	0.04	0.02
Maximum	1.11	0.37	0.24	0.15	0.12	0.09	0.07
$0,5e^{-0,3*g}$	x	0.37	0.27	0.20	0.15	0.11	0.08

TABEL 8: BENADERING $\frac{l_{ef}}{l}$ GESTEUND IN DE DRUKZONE



GRAFIEK 2: $\frac{l_{ef}}{l}$ UITGEZET TEGEN HET AANTAL KIPSTEUNEN

Het aantal ondersteuning wordt in de benadering g genoemd. De exponentiële benadering die het beste past voor deze waarden bij $1 \leq g \leq 6$ is:

$$\frac{l_{ef}}{l} = 0,5 \times e^{-0,3 \cdot g}$$

Zoals te zien is, geldt de benadering die gegeven wordt niet voor de situatie waarin er geen kipsteunen zijn toegepast. Voor deze situatie levert de formule:

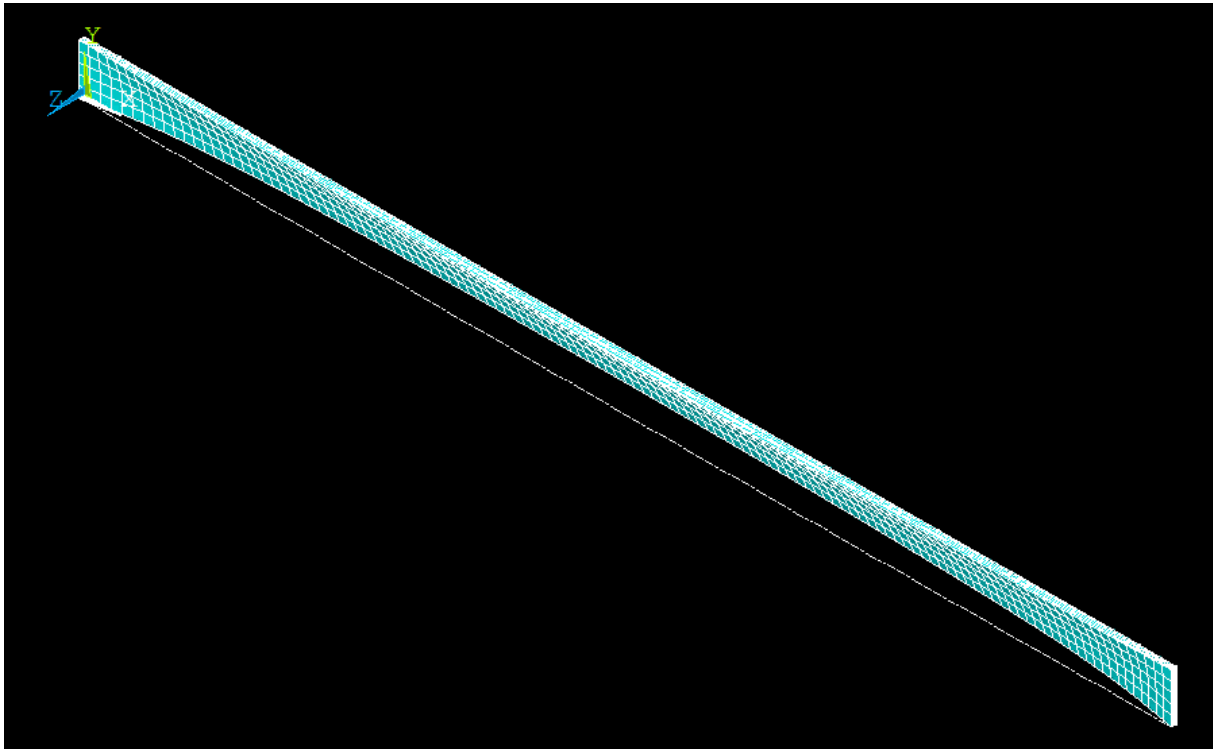
$$\frac{l_{ef}}{l} = 0,5 \times e^0 = 0,5$$

Wanneer er echter geen kipsteunen zijn zal er géén factor $\frac{l_{ef}}{l}$ voor kipsteunen worden gebruikt, wat gelijk staat aan een factor 1. Indien er geen kipsteunen zijn zal de formule niet nodig zijn, maar de formule mág in dat geval dus ook niet toegepast worden!

Verder is te zien voor $g \rightarrow \infty$:

$$\lim_{g \rightarrow \infty} \frac{l_{ef}}{l} = \lim_{g \rightarrow \infty} 0,5 \times e^{-0,3 \times g} = 0$$

Dit geldt in het geval dat de gehele bovenkant van de ligger niet meer in y-richting kan bewegen. Kipinstabiliteit is dan niet meer mogelijk in de vorm waarnaar in dit verslag is gekeken. Er zal echter een andere vorm van instabiliteit op treden met een kipvorm als te zien in figuur 6.



FIGUUR 6: KIPVORM VOOR $g \rightarrow \infty$

In deze kipvorm is het de getrokken zijde van de balk welke zijdelingse verplaatsing ondergaat. Dit zal echter alleen optreden bij zéér hoge belastingen. Deze belastingen zijn zo hoog dat er waarschijnlijker is dat het materiaal bezwijkt voor deze kipvorm optreedt. In de NEN6760 wordt deze situatie ook omschreven. Hierin staat dat in dit geval voldaan moet worden aan:

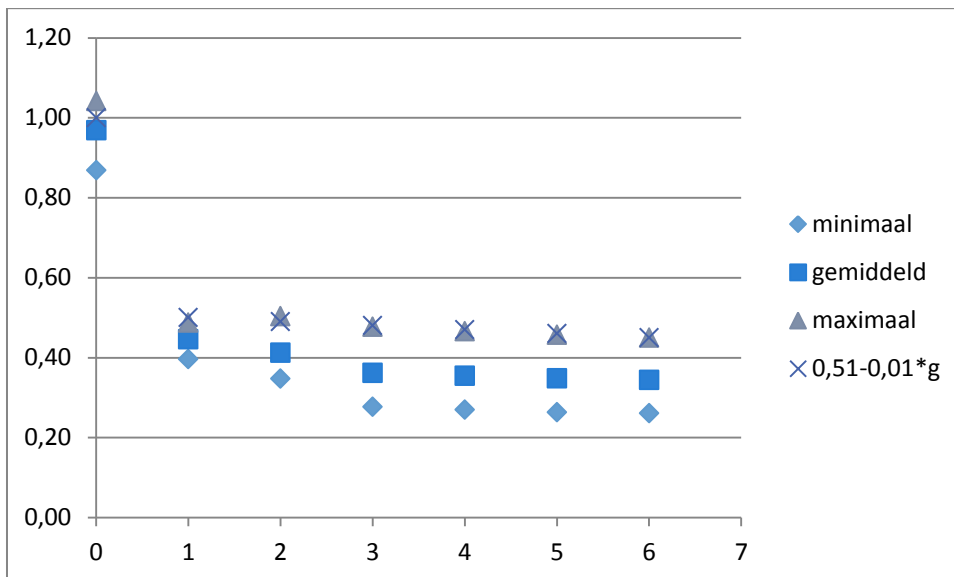
$$\frac{\sigma_{m;0;d}}{f_{m;0;d}} \leq 1$$

Wat hetzelfde is als de situatie waarin géén kip kan optreden. Er wordt dus vanuit gegaan dat het materiaal bezwijkt voor een dergelijke kipvorm optreedt.

Op dezelfde manier als voor liggers gesteund in de gedrukte zone is gezocht naar een benadering voor liggers gesteund in de getrokken zone.

$\frac{l_{ef}}{l}$	0	1	2	3	4	5	6
minimaal	0,87	0,40	0,35	0,28	0,27	0,26	0,26
gemiddeld	0,97	0,45	0,41	0,36	0,35	0,35	0,34
maximaal	1,04	0,49	0,50	0,48	0,47	0,46	0,45
0,51-0,01*g	1,00	0,50	0,49	0,48	0,47	0,46	0,45

TABEL 9: BENADERING $\frac{l_{ef}}{l}$ GESTEUND IN DE TREKZONE



GRAFIEK 3: $\frac{l_{ef}}{l}$ UITGEZET TEGEN HET AANTAL KIPSTEUNEN

Te zien is dat er in deze situatie een grotere spreiding in de resultaten te zien is. Opnieuw ga ik voor een veilige benadering door te kijken naar de maximale waarden.

De beste benadering voor de maximale waarde van $\frac{l_{ef}}{l}$ is een lineaire benadering. Deze is voor $1 \leq g \leq 6$:

$$\frac{l_{ef}}{l} = 0,51 - 0,01 \times g$$

Zoals te zien is, geldt de benadering die gegeven wordt niet voor de situatie waarin er geen kipsteunen zijn toegepast. Voor deze situatie levert de formule:

$$\frac{l_{ef}}{l} = 0,51 - 0,01 \times 0 = 0,51$$

Bij deze formule geldt dus hetzelfde als bij de formule voor steunen aan de gedrukte zijde van de ligger. De formule zal niet nodig zijn indien er geen kipsteunen zijn, maar de formule mág in dat geval ook niet toegepast worden!

Verder is te zien voor $g \rightarrow \infty$:

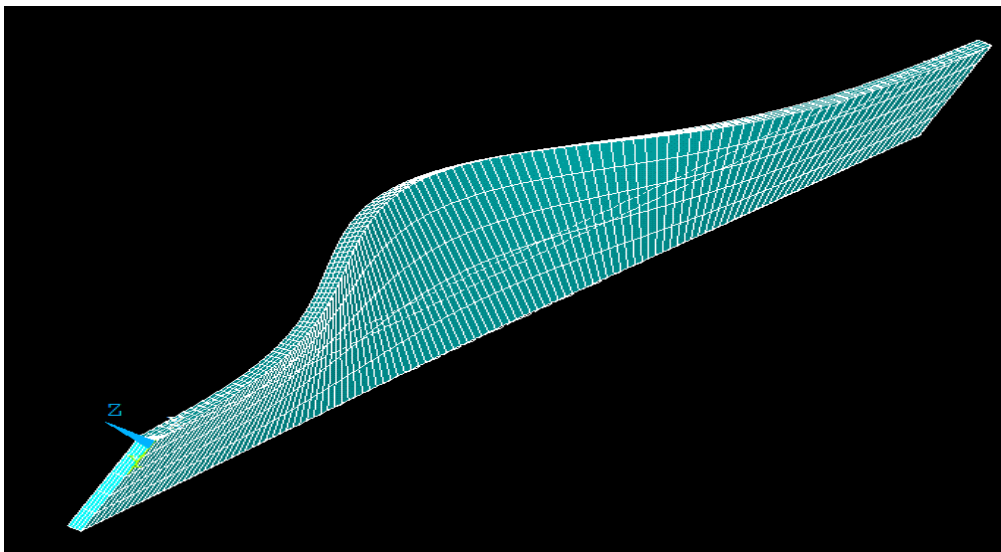
$$\lim_{g \rightarrow \infty} \frac{l_{ef}}{l} = \lim_{g \rightarrow \infty} 0,51 - 0,01 \times g = -\infty$$

Dit is echter onmogelijk omdat de waarde van l en l_{ef} beide groter moeten zijn dan 0. Voor een simulatie waarin $g = 50$ volgt :

$\frac{l_{ef}}{l}$	50
minimaal	0,26
gemiddeld	0,33
maximaal	0,41

TABEL 10: BENADERING $\frac{l_{ef}}{l}$ VOOR $G=50$

De kipvorm hierbij is de volgende:



FIGUUR 7: KIPVORM VOOR $G = 50$

Deze kipvorm en waarden voor $\frac{l_{ef}}{l}$ blijven constant voor kleine veranderingen in het aantal kipsteunen g . Ook wanneer $g = 120$ blijven deze waarden en kipvorm vrijwel gelijk. We kunnen $g = 50$ dus gelijk veronderstellen aan $g = \infty$.

De benadering die geldt voor $1 \leq g \leq \infty$ wordt:

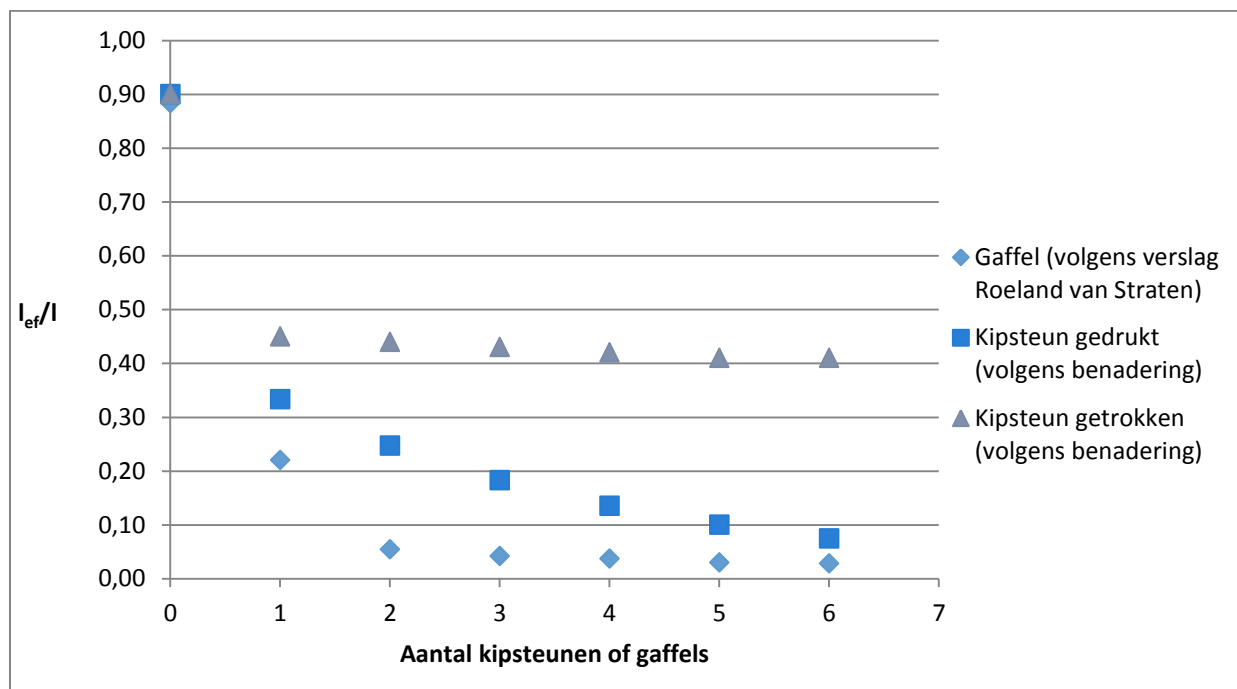
$$\frac{l_{ef}}{l} = 0,51 - 0,01 \times g = 0,51 \quad \text{waarbij: } \frac{l_{ef}}{l} \geq 0,4$$

VERGELIJKING KIPSTEUN MET GAFFELOPLEGGING

Het toepassen van kipsteunen die de ligger enkel in de druk- of trekzone ondersteunen in plaats van volledige gaffels kan gedaan worden omdat dit minder materiaalgebruik vereist. Hiervoor wordt wel een deel van de momentcapaciteit ingeleverd. Hoeveel dit is is bekeken door $\frac{l_{ef}}{l}$ te bepalen volgens de benaderingen die eerder in dit verslag zijn gegeven en met behulp van de benadering van Roeland van Straten [7] voor volledige gaffels. De l die hierin is gebruikt is de volledige liggerlengte. Verder is deze ligger belast met een q-last in het centrum van de doorsnede. Dit is gedaan voor 0, 1, 2, 3, 4, 5 en 6 kipsteunen of gaffels gelijk verdeeld over de lengte van de ligger. In onderstaande tabel en grafiek zijn deze waarden te zien.

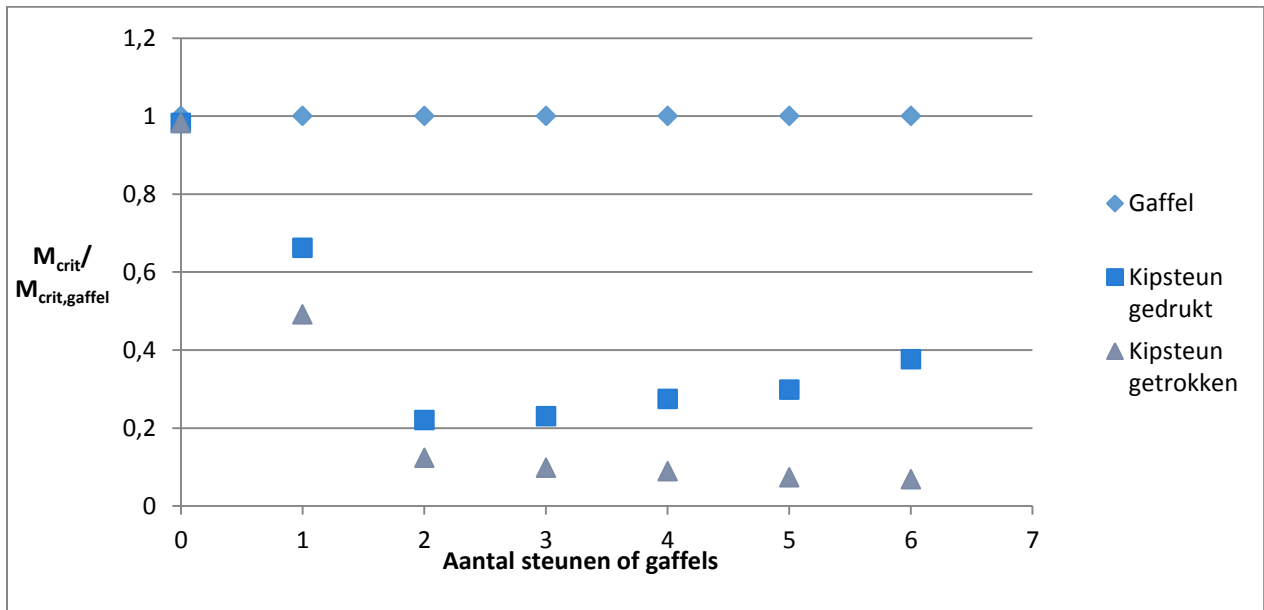
$\frac{l_{ef}}{l}$	0	1	2	3	4	5	6
Gaffel (volgens verslag Roeland van Straten)	0,88	0,22	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03
Kipsteun gedrukte zone (volgens benadering)	0,90	0,33	0,25	0,18	0,14	0,10	0,07
Kipsteun getrokken zone (volgens benadering)	0,90	0,45	0,44	0,43	0,42	0,41	0,41

TABEL 11: $\frac{l_{ef}}{l}$ VOOR GAFFELS EN VOOR KIPSTEUNEN



GRAFIEK4: $\frac{l_{ef}}{l}$ VOOR GAFFELS EN VOOR KIPSTEUNEN

Ook is bekeken hoe het theoretische kipmoment verandert wanneer gaffels die gelijk verdeeld zijn over de ligger worden vervangen door kipsteunen welke enkel de drukzone van de ligger ondersteunen. Hiervoor is de waarde van $\frac{M_{crit} \times l}{\sqrt{EI_z G I_t}}$ bepaald voor gaffels en voor kipsteunen. Om tot een duidelijke verhouding te komen is vervolgens de waarde van $\frac{M_{crit} \times l}{\sqrt{EI_z G I_t}}$ voor kipsteunen gedeeld door deze waarde voor gaffels. Deze waarden zijn in onderstaande grafiek weergegeven. Dit is tevens een waarde voor $\frac{M_{crit,kipsteun}}{M_{crit,gaffel}}$.



GRAFIEK 5: $\frac{M_{crit}}{M_{crit,gaffel}}$ VOOR KIPSTEUNEN EN GAFFELS

Ten eerste is te zien dat voor nul kipsteunen of gaffels het kritische kipmoment gelijk is. Dit is natuurlijk een logisch resultaat omdat een situatie zonder kipsteunen hetzelfde is als een situatie zonder gaffels.

Verder blijkt uit grafiek 5 dat het verschil tussen gaffels en kipsteunen (in de gedrukte of getrokken zone) relatief klein is wanneer er slechts één kipsteun is toegepast en dat dit verschil veel groter wordt wanneer er twee of meer kipsteunen worden gebruikt.

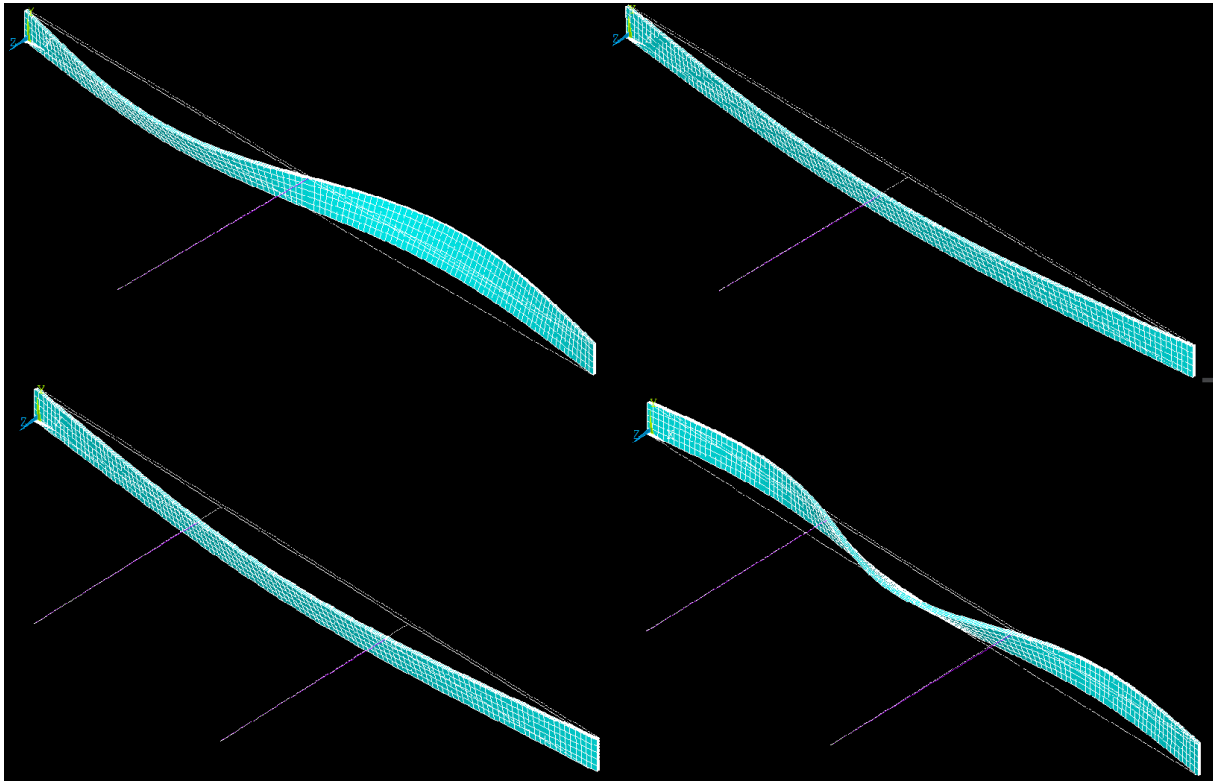
Ook is te zien dat het verschil tussen aangrijpen in de gedrukte of getrokken zijde een groot verschil in kritisch kipmoment tot gevolg heeft. Dit kan van belang zijn wanneer een ligger door bijvoorbeeld windbelasting en gewichtsbelastingen in twee richtingen wordt belast.

In de praktijk zal voor iedere situatie apart bekeken moeten worden of de kostenbesparing door het toepassen van kipsteunen in plaats van gaffels opweegt tegen het verlies in momentcapaciteit. Natuurlijk kunnen er ook andere overwegingen dan kosten zijn om kipsteunen toe te passen in plaats van gaffels.

EFFECT STIJFHEID KIPSTEUN

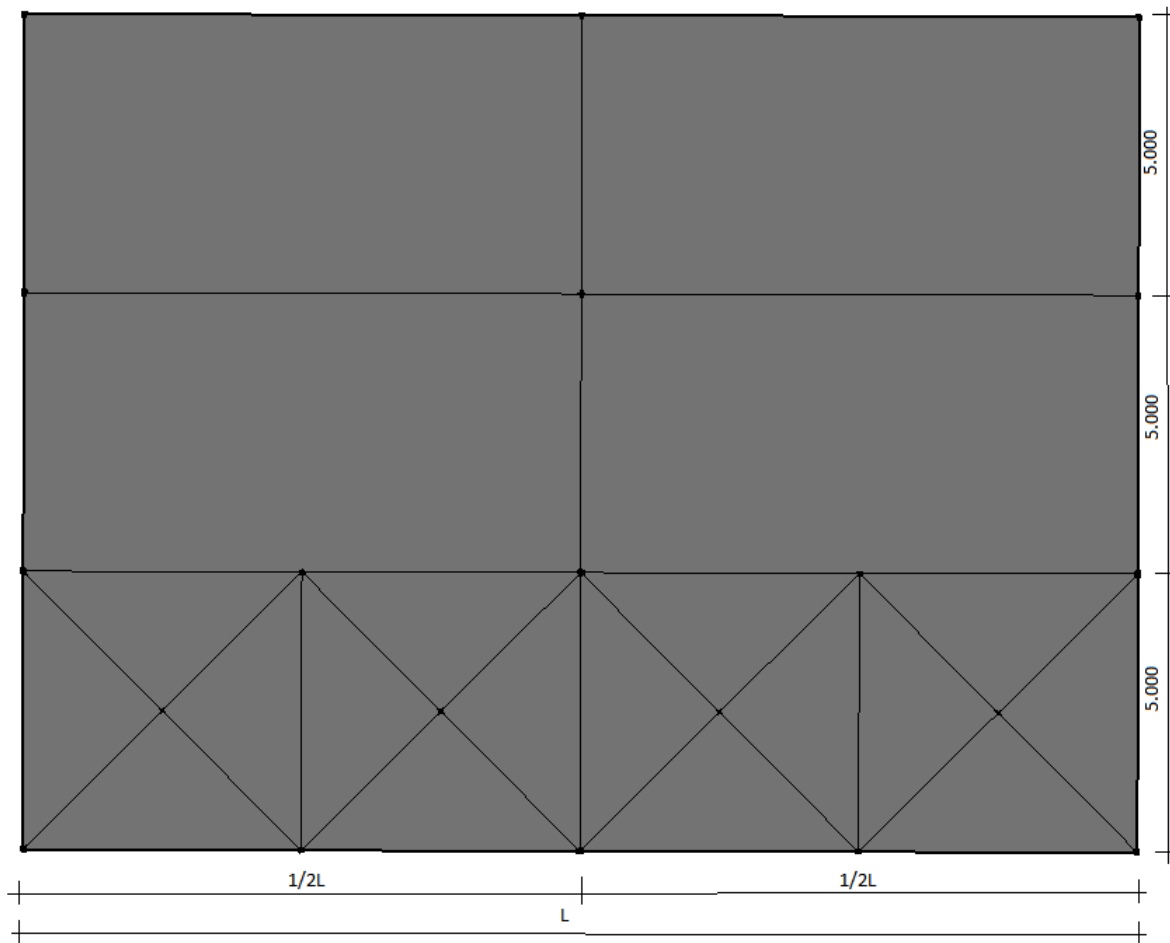
OMSCHRIJVING

In het geval dat de steun aan de gedrukte zijde van de ligger uit de vorige situatie niet beschouwd kan worden als een starre ondersteuning maar als een veer zal dit een ongunstig effect hebben op het kippedrag. Het gesteunde punt zal een beperkte verplaatsing in de y-richting kunnen hebben. Mogelijke kipvormen zijn te zien in figuur 8. Hierin is te zien dat de kipvorm sterk afhankelijk is van de mate van stijfheid van de ondersteuning. Ook de kiplast is hier sterk van afhankelijk.



FIGUUR 8: MOGELIJKE KIPVORMEN VOOR 1 OF 2 VERENDE ONDERSTEUNINGEN AFHANKELIJK VAN STIJFHEDEN

De orde van grootte van de stijfheid van deze ondersteuning wordt geschat door te kijken naar deze waarde in de praktijk. De kipsteunen worden in veel gevallen naar een stabiliteitsvakwerk in het dak geleid. Dit vakwerk is opgebouwd uit twee liggers die meestal gelijk zijn aan de beschouwde ligger en stalen stabiliteitsverbanden hier tussen. Een voorbeeld van een dergelijk dakplan, met één kipsteun en een hart op hart afstand van de hoofdliggers van 5.000mm is te zien in figuur 9. Deze 5.000mm is gekozen omdat dit een realistische waarde voor de praktijk is. Hiermee kan waarschijnlijk een realistische waarde voor k gevonden worden.



FIGUUR 9: DAKPLAN TEN BEHOEVE VAN ORDE GROOTTE SCHATTING K

De EI van het stabiliteitsvakwerk wordt met deze waarden als volgt geschat:

$$EI = E \times 2 \times A \times z^2$$

$$EI = 2 \times E \times b \times h \times \left(\frac{1}{2} \times 5.000\right)^2$$

$$EI = 12.500.000 \times E \times b \times h$$

Voor een kipsteun die precies in het midden van het vakwerk aangrijpt geldt het volgende vergeet-me-nietje:

$$w = \frac{Fl^3}{48EI}$$

Hieruit volgt de volgende waarde voor k:

$$k = \frac{48EI}{l^3}$$

Door de eerder gevonden waarde voor EI in te vullen krijgen we:

$$k = \frac{48 \times 12.500.000 \times E \times b \times h}{l^3} = \frac{6 \times 10^8 \times E \times b \times h}{l^3}$$

Deze waarde is dus een schatting van de veerstijfheid van de middelste kipsteun bij een hart op hart afstand van 5.000mm. De kipsteunen die niet in het midden zitten zullen zich stijver gedragen, maar in dit model zullen alle steunen ter simplificatie dezelfde veerstijfheid krijgen. De veerstijfheid zal gevarieerd worden tussen:

$$k = \frac{1}{2} \times \frac{6 \times 10^8 \times E \times b \times h}{l^3} \quad \text{En} \quad k = 4 \times \frac{6 \times 10^8 \times E \times b \times h}{l^3}$$

In 8 stappen.

MODEL IN ANSYS

In ANSYS zijn de steunen gemodeleerd als 10.000mm lange pendelstaven. Een stijfheid k in N/mm is als volgt gegeven:

$$k = \frac{F}{\Delta l} \quad \text{En} \quad \frac{\Delta l}{l} = \frac{F}{EA}$$

Geeft samen:

$$k = \frac{EA}{l}$$

In ANSYS is dit gedaan door lengte vast te zetten op 10.000mm en de elasticiteitsmodulus op 10^4N/mm^2 . Door dit te doen kan k aan worden gepast door enkel het staafoppervlak A aan te passen:

$$k = \frac{10^4 \times A}{10^4} = 1 \times A \Rightarrow A = k$$

Door middel van de code in bijlage 3 heeft ANSYS de volgende stappen doorlopen:

Lengtes tussen:	6.000mm en 30.000mm in stappen van 8.000mm
Hoogtes tussen:	$\frac{l}{22}$ en $\frac{l}{15}$ in 4 gelijke stappen
Breedtes tussen:	$\frac{h}{10}$ en $\frac{h}{20}$ in 4 gelijke stappen
Veerstijfheden tussen:	$\frac{1}{2} \times \frac{6 \times 10^8 \times E \times b \times h}{l^3}$ en $4 \times \frac{6 \times 10^8 \times E \times b \times h}{l^3}$ in 8 gelijke stappen

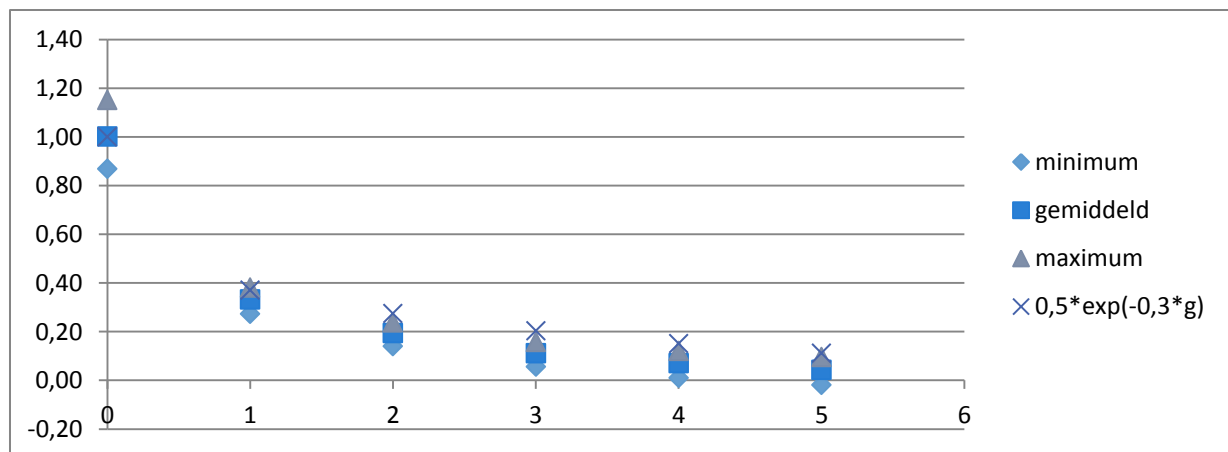
Voor situaties met 0,1,2,3,4 en 5 kipsteunen.

VERWERKING RESULTATEN

Opnieuw is eerst de $\frac{l_{ef}}{l}$ voor de standaardsituatie uitgerekend. Hiervan is alweer de minimale, gemiddelde en maximale waarde uitgezet tegen het aantal steunen om te kijken hoe dit zich verhoudt tot grafiek 2 uit de vorige analyse. De betreffende waarden staan in tabel 12 en grafiek 6. Ook is, ter vergelijking, de eerder gevonden benadering $0,5 \times e^{-0,3 \times g}$ in de tabel en in de grafiek gezet.

$\frac{l_{ef}}{l}$	0	1	2	3	4	5
Minimum	0,87	0,27	0,14	0,06	0,01	-0,02
Gemiddeld	1,00	0,33	0,19	0,11	0,07	0,04
Maximum	1,15	0,38	0,24	0,16	0,12	0,10
$0,5e^{-0,3 \times g}$	x	0,37	0,27	0,20	0,15	0,11

TABEL 12: $\frac{l_{ef}}{l}$ VOOR VERENDE KIPSTEUNEN



GRAFIEK 6: $\frac{l_{ef}}{l}$ VOOR VERENDE KIPSTEUNEN

Als grafiek 6 voor verende kipsteunen wordt vergeleken met grafiek 2 voor oneindig stijve kipsteunen blijken deze vrijwel overeen te komen. Dit toont aan dat de waarden voor k die als realistische stijfheden zijn aangenomen voldoende stijf zijn om kipgedrag te veroorzaken wat in de buurt komt van het gedrag voor oneindig stijve steunen. Het blijkt zelfs dat de waarde $\frac{l_{ef}}{l}$ pas significant veranderd als de waarde voor k een orde 10 tot 100 kleiner is. Er kan dus worden aangenomen dat voor de manier van ondersteunen volgens figuur 9 (stijve steunen direct verbonden met een stabiliteitsvakwerk) uit mag worden gegaan van oneindig stijve kipsteunen.

Voor andere situaties, waarin de kipsteunen niet als oneindig stijf beschouwd kunnen worden moet er gezocht worden naar waarden voor k waarvoor $\frac{l_{ef}}{l}$ wel significant verandert. Vanwege het beperkte tijdsbestek van dit project wordt hier verder niet op ingegaan.

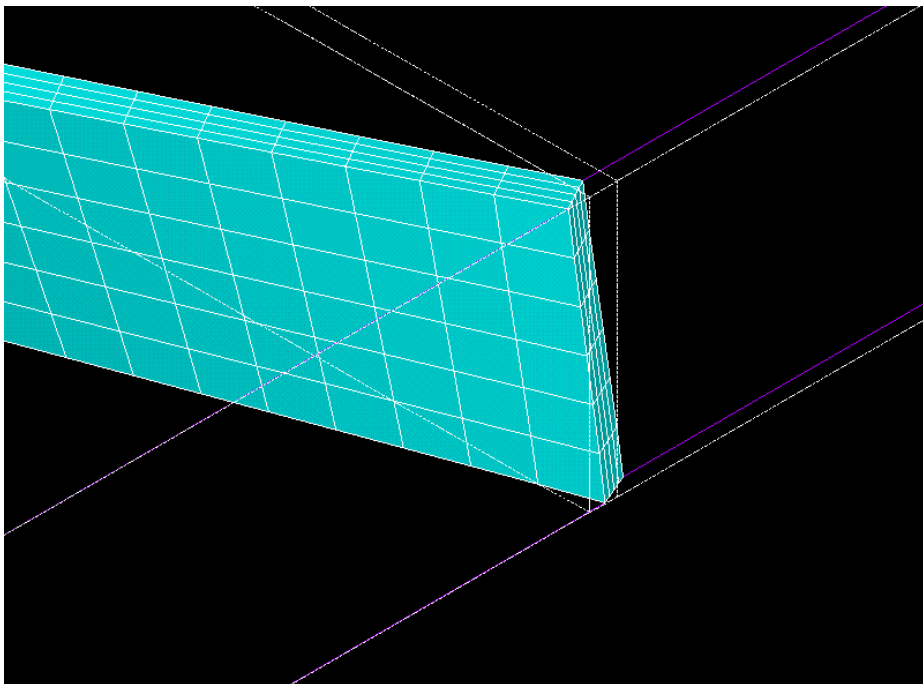
EFFECT STIJFHEID GAFFELOPLEGGING

OMSCHRIJVING

Indien de opleggingen de rotatie om de x-as niet volledig belemmeren zal dit een ongunstig effect hebben op het kipgedrag. De invloed van deze stijfheid zal onderzocht worden voor een ligger welke niet gesteund wordt door gaffels of kipsteunen.

MODEL IN ANSYS

In ANSYS is de gaffelopleggingen gemaakt door verplaatsingen te verhinderen in het centrum van de doorsnede. Alle hoekpunten worden vervolgens met een veer op hun plaats gehouden. Dit is te zien in figuur 9.



FIGUUR 10: UITVOERING ROTATIEVEREN OPLEGGING

De veerstijfheid k als functie van de rotatiestijfheid r is als volgt bepaald:

$$M = 4 \times F \times a$$

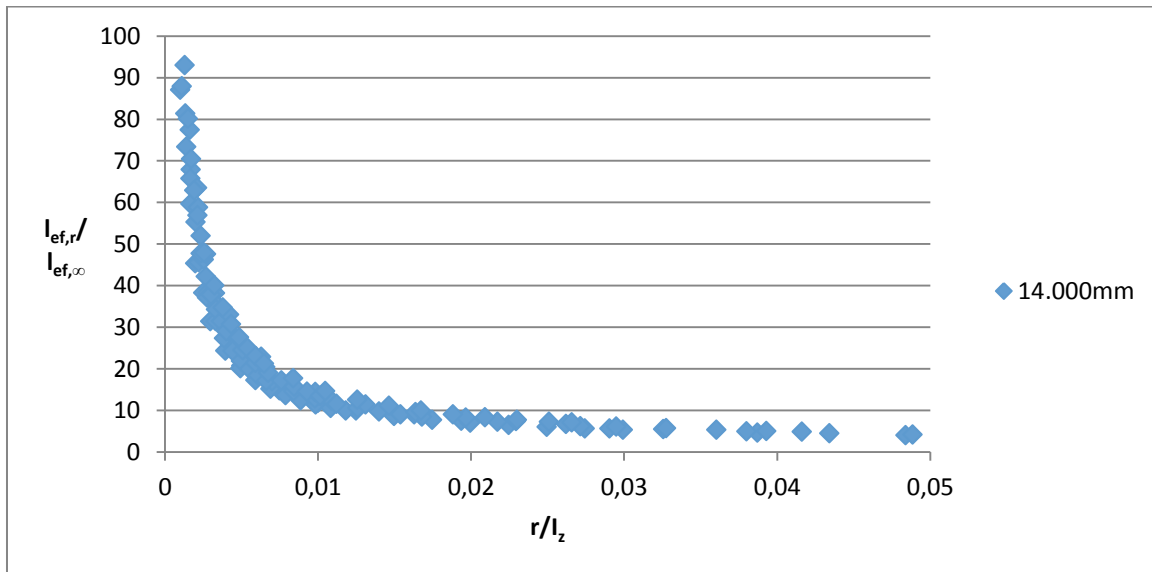
$$\delta\theta \times r = 4 \times \delta\theta \times \frac{1}{2}h \times k \times \frac{1}{2}h$$

$$r = h^2 \times k \quad \rightarrow \quad k = \frac{r}{h^2}$$

De code om de kiplasten te bepalen voor verschillende lengten hoogten breedten en veerstijfheden is te vinden in bijlage 4.

VERWERKING RESULTATEN.

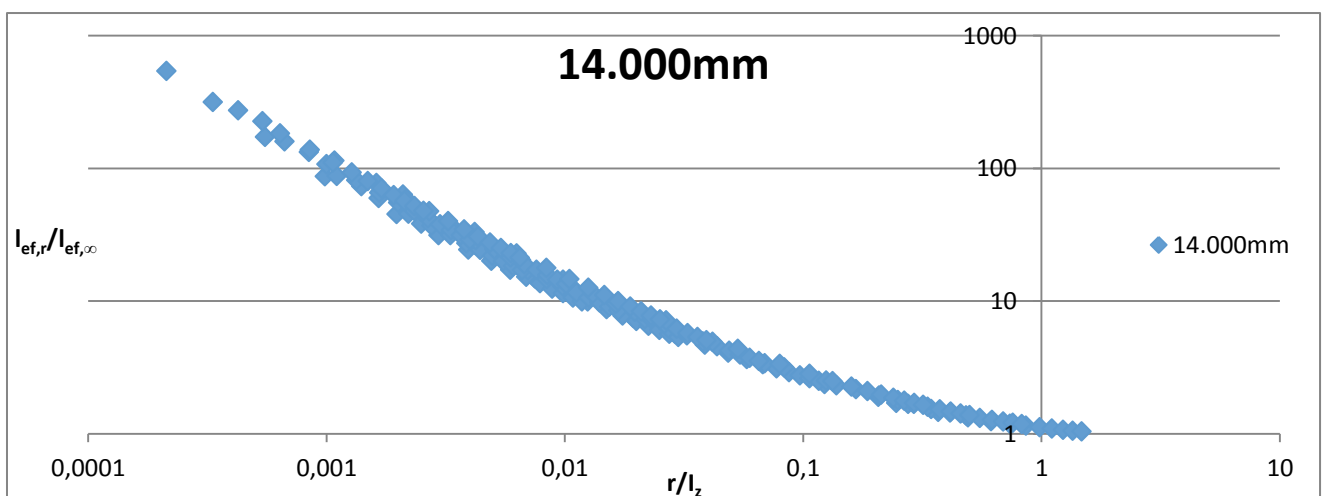
Ook hier heb ik weer de waarde voor $\frac{l_{ef}}{l}$ voor de standardsituatie bepaald. Deze waarde heb ik gedeeld voor de waarde van $\frac{l_{ef}}{l}$ voor oneindig stijve gaffelopleggingen. De waarde die hier uitkomt noem ik $\frac{l_{ef,r}}{l_{ef,\infty}}$. Wanneer ik voor een balk van 14.000mm deze waarde uitzet tegen de $\frac{r}{l_z}$ krijg ik de volgende figuur waarvoor de waarden van $\frac{l_{ef,r}}{l_{ef,\infty}}$ redelijk op een lijn lijken te liggen.



GRAFIEK 7: $\frac{l_{ef,r}}{l_{ef,\infty}}$ VOOR EEN LIGGER VAN 14 METER

Er blijkt echter nog een grote spreiding te zitten in deze waarden, vooral rond $\frac{r}{l_z} = 0,005$. Deze meetwaarden vervangen door één lijn zou dus niet erg zinvol zijn.

Op een dubbele logaritmische schaal blijken deze waarden bijna op een lijn te liggen:



GRAFIEK 8: $\frac{l_{ef,r}}{l_{ef,\infty}}$ VOOR EEN LIGGER VAN 14 METER OP LOGARITMISCHE SCHAALEN

Maar ook hierin blijft de spreiding te groot om hier duidelijke uitspraken over te doen.

Wat ik wel uit deze figuren kan halen is dat voor de gekozen waarden van r in mijn model de waarden van $\frac{l_{ef,r}}{l_{ef,\infty}}$ tussen de 1 en 550 liggen. Een waarde van 550 betekend dat de kiplast 550 keer kleiner is dan in de situatie waarin r oneindig stijf is. De meeste waarden gekozen in het model zijn dus geen waarden welke in de praktijk veel voor zullen komen. We zullen meer moeten kijken naar het laagste gedeelte van grafiek 8, waar $1 \leq \frac{l_{ef,r}}{l_{ef,\infty}} \leq 10$. Ook vanwege het korte tijdsbestek van dit project zal ik hier niet dieper op in gaan.

4. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN VOOR DE PRAKTIJK

NORM ONDERZOEK

Uit het literatuuronderzoek zijn verschillende conclusies getrokken. De belangrijkste conclusie is dat er in de Eurocode 5 én in de NEN6760 geen informatie wordt gegeven om voor houten liggers met een rechthoekige doorsnede een berekening met betrekking tot kipstabiliteit uit te voeren indien deze ligger tegen kip is gesteund door enkel één of meerdere punten, in de gedrukte of de getrokken zone van deze ligger, te verhinderen tot verplaatsen in de y-richting.

Verder blijkt dat de regels in Eurocode 3 welke geldig zijn voor stalen profielen met een gesteunde flens welke kipinstabiliteit moet voorkomen niet toe te passen zijn op houten liggers met een rechthoekige doorsnede omdat deze regels onvoldoende rekening houden met het oppervlaktetraagheidsmoment om de zwakke as en het torsietraagheidsmoment van de doorsnede.

SIMULATIE & ONDERZOEK

Uit de simulaties die gedaan zijn blijkt dat, voor liggers gesteund door oneindig stijve ondersteuning, in de gedrukte zone, met gelijke afstanden tussen de steunen en opleggingen en belast door een q-last, de waarde voor $\frac{l_{ef}}{l}$ benaderd kan worden door:

$$\frac{l_{ef}}{l} = 0,5 \times e^{-0,3 \times g}$$

Waarin g het aantal ondersteuning, en l de gehele liggerlengte is.

Voor dezelfde situatie maar dan met steunen welke de getrokken zone van de ligger ondersteunen geldt de volgende benadering:

$$\frac{l_{ef}}{l} = 0,51 - 0,01 \times g \quad \text{waarbij: } \frac{l_{ef}}{l} \geq 0,4$$

De geldigheid van deze formules is alleen bevestigd voor liggers belast met een q-last. De toepasbaarheid van deze formules voor andere momentverdelingen zal nog onderzocht moeten worden.

Verder is er gevonden dat de ondersteuning als oneindig stijf mogen worden beschouwd wanneer ze zijn uitgevoerd als stijve steunen welke hun krachten direct naar een stabiliteitsverband in het dakvlak overbrengen.

Ook is er gekeken naar de invloed van de rotatiestijfheid van de gaffelopleggingen op de effectieve kiplengte. Vanwege tijdsgebrek zijn hier geen conclusies uit voort gekomen.

De methode om van de gehele liggerlengte l naar een waarde voor l_{ef} te komen is als volgt.

$$l_{ef} = 0,9 \times \frac{l_{ef}}{l} \times l$$

Hierin is 0,9 de factor die de momentverdeling in rekening brengt. $\frac{l_{ef}}{l}$ is de factor uit mijn benaderingsformules en l is de gehele liggerlengte.

l_{ef} kan vervolgens in de formule uit Eurocode 5 en blz. 11 uit dit verslag worden ingevuld om de kritische buigspanning te krijgen.

5. AANBEVELINGEN VOOR VERVOLGONDERZOEK

Na dit verslag zullen er nog een aantal vragen onbeantwoord zijn. Deze zaken zouden door een vervolgonderzoek opgelost kunnen worden. Vervolgonderzoeken die een beter inzicht in kipinstabiliteit zouden kunnen geven zouden kunnen zijn:

- Een verdergaand onderzoek naar een factor welke de invloed van de stijfheid van de kipsteunen in rekening brengt
- Een verdergaand onderzoek naar een factor welke de invloed van de rotatiestijfheid van de gaffelopleggingen in rekening brengt
- Een onderzoek naar de invloed van de locatie van de kipsteunen (bijvoorbeeld dichter op elkaar plaatsen rondom het piekmoment)
- Een onderzoek naar de geldigheid van mijn gegeven formules voor situaties waarin de belasting anders is dan een q-last. Bijvoorbeeld voor constante momenten, puntlasten en andere verdelingen.

NAWOORD

In dit verslag heeft u de resultaten van mijn onderzoek naar de effectieve kiplengte van houten liggers kunnen lezen. Graag wil ik dit nawoord gebruiken om een aantal bevindingen te noemen welke ik heb gedaan met betrekking tot het doen van een eigen onderzoek. Dit zijn voornamelijk zaken verkeerd in heb geschat of beter had kunnen doen.

Ten eerste had ik het leren werken met ANSYS minder tijdrovend ingeschat. Stiekem kost het doorkrijgen van dit programma toch snel een hele week. Een week waarin je toch verwacht had ook wat op papier te krijgen.

Ten tweede heb ik te weinig tijd gestoken in mijn literatuurstudie voordat ik aan mijn simulaties en onderzoek ben begonnen. Hierdoor moest ik vaak het onderzoek onderbreken om zaken op te zoeken welke ik eigenlijk al lang had moeten weten. Verder had ik ook mijn model anders opgebouwd als ik meer tijd in de literatuurstudie had gestoken. Op dit moment grijpt in het gebruikte model de belasting aan op een uiterste vezel van de balk. Als ik beter naar de normen en andere literatuur had gekeken was het verstandiger geweest deze in het hart van de doorsnede aan te laten grijpen of zelfs te vervangen door een constant moment. Hier kwam ik echter pas in een te laat stadium van mijn onderzoek achter.

Het doen van een zelfstandig onderzoek vond ik vaak erg tegenvallen omdat er vaak momenten waren waarop ik vastliep. Er gaat vervolgens weer tijd overheen voordat ik, al dan niet met hulp van mijn begeleiders, verder kom met dit probleem. Op momenten waarop het echter wel lekker liep en er ook écht resultaten op tafel komen vond ik het weer wel erg leuk om te doen.

Graag wil ik nogmaals mijn begeleiders bedanken voor de hulp die zij geboden hebben bij mijn Eindwerk. Ik wil graag afsluiten door mijn hoop uit te spreken dat er een positief resultaat zal volgen.

BRONVERMELDING

Literatuur

- [1] **Hartsuijker, C, 1999**
Toegepaste mechanica Deel 1: evenwicht. –Den Haag
- [2] **Hartsuijker, C, 2001**
Toegepaste mechanica Deel 2: spanningen, vervormingen, verplaatsingen. –Den Haag
- [3] **Vries, P.A. de en Kuilen J.W.G. van de, 2010**
Collegedictaat CT2052 Deel Houtconstructies. –Delft

Normen

- [4] **Eurocode 3: Staal**
Ontwerp en berekening van staalconstructies (EN 1993)
- [5] **Eurocode 5: Hout**
Ontwerp en berekening van houtconstructies (EN 1995)
- [6] **NEN 6760, 2008**
Technische grondslagen voor bouwconstructies - TGB 1990 - Houtconstructies - Basiseisen en bepalingsmethoden

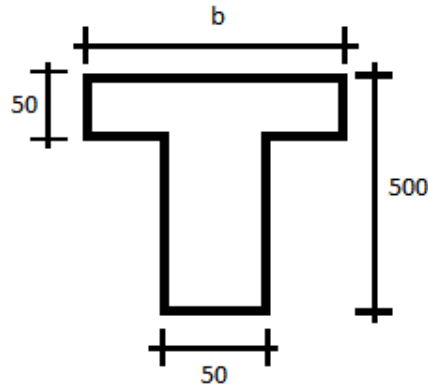
Oude verslagen

- [7] **Straten, R van, 2012**
De effectieve kiplengte van houten liggers. -Delft
- [8] **Oorebeek, M, 2013**
Het verschil tussen 1^e- en 2^e-orde kipinstabiliteitsberekeningen, -Delft

BIJLAGEN

BIJLAGE 1: TOEPASBAARHEID EUROCODE 3

Om te kijken in hoe verre de rekenregels voor Eurocode 3 toepasbaar zijn op houten liggers wordt een stalen en een houten profiel bekeken van de volgende afmetingen:



Het normaalkrachtencentrum van deze doorsnede ligt op een afstand van $\frac{25b+123750}{b+450}$ ten opzichte van de bovenste vezel. b wordt gevarieert tussen 500mm en 50mm. Bij $b = 50$ is deze doorsnede gereduceerd tot een rechthoek. De gebruikte staalsoort is S235 en de gebruikte houtsoort is GL24H. Hiermee kunnen we bekijken hoe deze formule verhinderde flensbuiging in rekening brengt wanneer er geen daadwerkelijke flens meer is. Voor een stalen en een houten profiel zal de maximale ongesteunde lengte L_c bepaald worden voor een constant moment van $\frac{M_{c,Rd}}{2}$. Hiervoor wordt de volgende formule gebruikt:

$$\frac{k_c L_c}{i_{f,z} \lambda_1} \leq \lambda_{c0} \frac{M_{c,Rd}}{M_{y,Ed}} \rightarrow L_c \leq \lambda_{c0} \frac{M_{c,Rd}}{k_c M_{y,Ed}} i_{f,z} \lambda_1$$

Hierin zijn:

$k_c = 1$ voor constante moment verdeling

$\lambda_{c0} = \lambda_{LT,0} + 0,1 = 0,4 + 0,1 = 0,5$

$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} / \pi \sqrt{\frac{E_{0,0.05}}{f_{m;0;k}}}$

$i_{f,z} =$ De traagheisstraal van de equivalente op druk belaste flens $\sqrt{\frac{I}{A}}$ om de zwakke as van het gehele profiel.

$M_{c,Rd} = W_y \frac{f_y}{\gamma_{m1}} / W_y f_{m;0;k}$

Staal:

b[mm]	Dikte[mm]	$I_z[\text{mm}^4]$	$A[\text{mm}^2]$	$i_z[\text{mm}]$	$W_y[\text{mm}^3]$	$M_{c,rd}[\text{Nmm}]$	$M_{y,ed}[\text{Nmm}]$	$\lambda_1[-]$	$k_c[-]$	$\lambda_{co}[-]$
500	31,14	5,21E+08	26557	140,09	2,08E+06	4,48E+08	2,24E+08	98,18	1	0,5
450	33,33	3,80E+08	24167	125,40	1,69E+06	3,63E+08	2,24E+08	98,18	1	0,5
400	35,78	2,67E+08	21789	110,70	1,33E+06	2,87E+08	2,24E+08	98,18	1	0,5
350	38,54	1,79E+08	19427	96,00	1,02E+06	2,19E+08	2,24E+08	98,18	1	0,5
300	41,67	1,13E+08	17083	81,31	7,50E+05	1,61E+08	2,24E+08	98,18	1	0,5
250	45,24	6,56E+07	14762	66,65	5,21E+05	1,12E+08	2,24E+08	98,18	1	0,5
200	49,36	3,38E+07	12468	52,10	3,33E+05	7,17E+07	2,24E+08	98,18	1	0,5
150	54,17	1,46E+07	10208	37,85	1,88E+05	4,03E+07	2,24E+08	98,18	1	0,5
100	59,85	4,79E+06	7992	24,48	8,33E+04	1,79E+07	2,24E+08	98,18	1	0,5
50	66,67	1,22E+06	5833	14,43	2,08E+04	4,48E+06	2,24E+08	98,18	1	0,5

Hout:

b[mm]	Dikte[mm]	$I_z[\text{mm}^4]$	$A[\text{mm}^2]$	$i_z[\text{mm}]$	$W_y[\text{mm}^3]$	$M_{c,rd}[\text{Nmm}]$	$M_{y,ed}[\text{Nmm}]$	$\lambda^1[-]$	$k_c[-]$	$\lambda_{co}[-]$
500	31,14	5,21E+08	26557	140,09	2,08E+06	5,00E+07	2,50E+07	62,17	1	0,5
450	33,33	3,80E+08	24167	125,40	1,69E+06	4,05E+07	2,50E+07	62,17	1	0,5
400	35,78	2,67E+08	21789	110,70	1,33E+06	3,20E+07	2,50E+07	62,17	1	0,5
350	38,54	1,79E+08	19427	96,00	1,02E+06	2,45E+07	2,50E+07	62,17	1	0,5
300	41,67	1,13E+08	17083	81,31	7,50E+05	1,80E+07	2,50E+07	62,17	1	0,5
250	45,24	6,56E+07	14762	66,65	5,21E+05	1,25E+07	2,50E+07	62,17	1	0,5
200	49,36	3,38E+07	12468	52,10	3,33E+05	8,00E+06	2,50E+07	62,17	1	0,5
150	54,17	1,46E+07	10208	37,85	1,88E+05	4,50E+06	2,50E+07	62,17	1	0,5
100	59,85	4,79E+06	7992	24,48	8,33E+04	2,00E+06	2,50E+07	62,17	1	0,5
50	66,67	1,22E+06	5833	14,43	2,08E+04	5,00E+05	2,50E+07	62,17	1	0,5

Dit levert de volgende maximale waarden voor L_c op:

b[mm]	$L_{c,max,staal}[\text{mm}]$	$L_{c,max,hout}[\text{mm}]$
500	1,38E+04	8,71E+03
450	9,97E+03	6,32E+03
400	6,96E+03	4,41E+03
350	4,62E+03	2,92E+03
300	2,87E+03	1,82E+03
250	1,64E+03	1,04E+03
200	8,19E+02	5,18E+02
150	3,34E+02	2,12E+02
100	9,61E+01	6,09E+01
50	1,42E+01	8,97E+00

Deze L_c varieert voor een stalen ligger tussen 13.800mm meter voor een flens van 500mm, tot 14,2mm voor een stalen ligger zonder flens.

Voor een houten ligger varieert dit tussen 8.710mm bij een flens van 500mm, tot 8,97mm voor een houten ligger zonder flens.

BIJLAGE 2: CODE ANSYS ONVOLLEDIGE KIPSTEUN

Hier wordt de code gegeven die door ANSYS gebruikt wordt om de kiplast te bepalen voor een aantal balken waarvoor de lengte, breedte, hoogte en het aantal kipsteunen variabel zijn. Vervolgens worden deze kiplasten in een .txt bestand geschreven wat weer gebruikt kan worden om in Excel uit te lezen.

```
! Constructie 1
! ANSYS macro
! Genereert een glulam ligger met gelijkmatig verdeelde lijnlast en gaffelopleggingen
! eerste versie door P.C.J. Hoogenboom, December 2012
! tweede versie door M. Oorebeek, December 2012
! laatst aangepast door S. Reinders, Juni 2013

*CFOPEN,out,txt                      ! out.txt openen
adiv = ' | '
*VWRITE,'lengte','breedte','hoogte','steunen',adiv,'lambda1','lambda2','lambda3'      ! naar out.txt
schrijven
(A13,A13,A13,A13,A3,A13,A13,A13)

*DO,gg,0,6
*DO,aa,0,24
*DO,bb,0,9
*DO,cc,0,9

l = 6000+aa*1000                      ! lengte [mm]
h = l/22+(l/15-l/22)/10*bb            ! hoogte [mm]
b = h/10+(h/2-h/10)/10*cc            ! breedte [mm]
ec = l/500                            ! maximale zijdelingse excentriciteit van de middendoorsnede
(midden tussen twee steunpunten) voor gelamineerd hout[mm]
nl = 120                             ! aantal elementen in de x richting [-]
nh = 5                               ! aantal elementen in de y richting [-]
nb = 4                               ! aantal elementen in de z richting [-](moet een even getal zijn,
anders staat de lijnlast niet in het midden)
q = 1                                ! lijnlast [N/mm]
g = gg                               ! aantal kipsteunen [-](gelijk verdeeld over de lengte)

/PREP7
SHPP,MODIFY,1,500

MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0                          ! materiaal: orthotroop, waarden voor 2e orde geometrisch
niet lineaire berekening voor houtklasse GL24h
MPDATA,EX,1,,9400
MPDATA,EY,1,,313.33
MPDATA,EZ,1,, 313.33
MPDATA,PRXY,1,,0.372
MPDATA,PRYZ,1,,0.435
MPDATA,PRXZ,1,,0.467
MPDATA,GXY,1,,587.5
MPDATA,GYZ,1,,50
MPDATA,GXZ,1,,587.5
MPDATA,DENS,1,,3.43E-006            ! dichtheid
ET,1,SOLID185                       ! element type: 8 node solid

*DO,i,0,nb                          ! plaats knopen
*DO,j,0,nh
*DO,k,0,nl
x=k*l/nl
```

```

y=j*h/nh
z=i*b/nb+ec*SIN(x*3.1415/l)
N,,x,y,z,,,
*ENDDO
*ENDDO
*ENDDO

*DO,i,1,nb                                ! plaats elementen
*DO,j,1,nh
*DO,k,1,nl
a=k+(j-1)*(nl+1)+(i-1)*(nl+1)*(nh+1)

E,a+1,a+nl+2,a+nl+1,a,a+(nl+1)*(nh+1)+1,a+(nl+1)*(nh+1)+nl+2,a+(nl+1)*(nh+1)+nl+1,a+(nl+1)*(nh+1)
)

*ENDDO
*ENDDO
*ENDDO

*DO,i,0,nl                                ! plaats lijnlast
F,(nh+1)*(nl+1)*nb/2+nh*(nl+1)+1+i,FY,-q*l/nl
*ENDDO

*DO,i,0,nb                                ! plaats steunpunten
D,(nl+1)*(nh+1)*i+1,,0,,,,,UY,,,,
*ENDDO
*DO,i,0,nb
D,(nl+1)*(nh+1)*i+nl+1,,0,,,,,UY,,,,
*ENDDO
*DO,i,0,nh
D,(nl+1)*(nh+1)*nb+1+i*(nl+1),,0,,,,,Uz,,,
*ENDDO
*DO,i,0,nh
D,(nl+1)*(nh+1)*nb+(nl+1)*(i+1),,0,,,,,Uz,,,
*ENDDO
D,(nl+1)*(nh+1)*nb+1,,0,,,UX,,,,,

*DO,i,1,g                                ! plaats kipsteunen
D,(nl+1)*(nh+1)*(nb+1)-(nl+1)/(g+1)*i,,0,,,,,Uz,,,
*ENDDO

/SOLU
ANTYPE,STATIC,NEW                        ! statisch oplossen
SOLVE
FINISH
/SOLU
ANTYPE,BUCKLE,NEW,                      ! buckling oplossen
BUCOPT,LANB,3
MXPAND,3
SOLVE
FINISH

/POST1
SET,FIRST
*GET,lamba1,ACTIVE,0,SET,TIME/FREQ

SET,NEXT
*GET,lamba2,active,0,SET,TIME/FREQ

SET,NEXT

```

```

*GET,lambda3,active,0,SET,TIME/FREQ

*VWRITE,l,b,h,g,adiv,lambda1,lambda2,lambda3      ! naar out.txt schrijven
(F13.5,F13.5,F13.5,F13.5,A3,F13.5,F13.5,F13.5)
FINISH

PARSAV,SCALAR,aa
PARSAV,SCALAR,bb
PARSAV,SCALAR,cc
PARSAV,SCALAR,gg

/CLEAR,NOSTART                                !simulatie wissen

PARRES,CHANGE,aa
PARRES,CHANGE,bb
PARRES,CHANGE,cc
PARRES,CHANGE,gg

*ENDDO
*ENDDO
*ENDDO
*ENDDO

*CFCLOS                                         ! close file out.txt
*UILLIST,out.txt                               ! pop up out.txt

```

*Voor het opstellen van deze code is de code uit het verslag van Mitchel Oorebeek[8] gebruikt.

BIJLAGE 3: CODE ANSYS VERENDE ONVOLLEDIGE KIPSTEUN

Hier wordt de code gegeven die door ANSYS gebruikt wordt om de kiplast te bepalen voor een aantal balken waarvoor de lengte, breedte, hoogte, de veerstijfheid en het aantal kipsteunen variabel zijn. Vervolgens worden deze kiplasten in een .txt bestand geschreven wat weer gebruikt kan worden om in Excel uit te lezen.

```
! Constructie 1
! ANSYS macro
! Genereert een glulam ligger met gelijkmatig verdeelde lijnlast, gaffelopleggingen en verende
kipondersteuning in de drukzone
! eerste versie door P.C.J. Hoogenboom, December 2012
! tweede versie door M. Oorebeek, December 2012
! laatst aangepast door S. Reinders, Juni 2013

*CFOPEN,out.txt                      ! out.txt openen
adiv = ' | '
*VWRITE,'lengte','breedte','hoogte','steunen','k',adiv,'lambda1','lambda2','lambda3'      ! naar
out.txt schrijven
(A13,A13,A13,A13,A13,A3,A13,A13,A13)

*DO,gg,0,5
*DO,aa,0,3
*DO,bb,0,3
*DO,cc,0,3
*DO,TT,1,8

l = 6000+aa*(30000-6000)/3           ! lengte [mm]
h = l/22+(l/15-l/22)/3*bb           ! hoogte [mm]
b = h/10+(h/2-h/10)/3*cc            ! breedte [mm]
T = TT*(300000000*9400*b*h)/(l*I)    ! veerstijfheid kipsteunen [N/mm]
ec = l/500                           ! maximale zijdelingse excentriciteit van de middendoorsnede
(midden tussen twee steunpunten) voor gelamineerd hout[mm]
nl = 120                             ! aantal elementen in de x richting [-]
nh = 5                               ! aantal elementen in de y richting [-]
nb = 4                               ! aantal elementen in de z richting [-](moet een even getal zijn,
anders staat de lijnlast niet in het midden)
q = 1                                ! lijnlast [N/mm]
g = gg                               ! aantal kipsteunen [-](gelijk verdeeld over de lengte)

/PREP7
SHPP,MODIFY,1,500                    ! element slankheid waarschuwing uitstellen

MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0                          ! materiaal: orthotroop, waarden voor 2e orde geometrisch
niet lineaire berekening voor houtklasse GL24h
MPDATA,EX,1,,9400
MPDATA,EY,1,,313.33
MPDATA,EZ,1,, 313.33
MPDATA,PRXY,1,,0.372
MPDATA,PRYZ,1,,0.435
MPDATA,PRXZ,1,,0.467
MPDATA,GXY,1,,587.5
MPDATA,GYZ,1,,50
MPDATA,GXZ,1,,587.5
MPDATA,DENS,1,,3.43E-006            ! dichtheid

MPDATA,EX,2,,1e4                    ! materiaal steunen
```

```

R,1,T,0,0                                ! Real constants voor steunen

ET,1,SOLID185                             ! element type: 8 node solid
ET,2,LINK180                             ! element type: 3-D Spar

*DO,i,0,nb                                ! plaats knopen balk
*DO,j,0,nh
*DO,k,0,nl
x=k*I/nl
y=j*h/nh
z=i*b/nb+ec*SIN(x*3.1415/I)
N,,x,y,z,,
*ENDDO
*ENDDO
*ENDDO

*DO,i,1,g                                ! plaats knopen kipsteunen
x=i*I/(g+1)
y=h
z=b+ec*SIN(x*3.1415/I)+10000
N,,x,y,z,,
*ENDDO

TYPE,1
MAT,1

*DO,i,1,nb                                ! plaats elementen balk
*DO,j,1,nh
*DO,k,1,nl
a=k+(j-1)*(nl+1)+(i-1)*(nl+1)*(nh+1)

E,a+1,a+nl+2,a+nl+1,a,a+(nl+1)*(nh+1)+1,a+(nl+1)*(nh+1)+nl+2,a+(nl+1)*(nh+1)+nl+1,a+(nl+1)*(nh+1)
)

*ENDDO
*ENDDO
*ENDDO

TYPE,2
REAL,1
MAT,2

*DO,i,1,g                                ! plaats elementen ondersteuning
E,(nh+1)*(nl+1)*(nb+1)+i,(nl+1)*(nh+1)*(nb+1)-(nl)+(nl)/(g+1)*i
*ENDDO

*DO,i,0,nl                                ! plaats lijnlast
F,(nh+1)*(nl+1)*nb/2+nh*(nl+1)+1+i,FY,-q*I/nl
*ENDDO

*DO,i,0,nb                                ! plaats steunpunten
D,(nl+1)*(nh+1)*i+1,,0,,,,,UY,,,,
*ENDDO
*DO,i,0,nb
D,(nl+1)*(nh+1)*i+nl+1,,0,,,,,UY,,,,
*ENDDO
*DO,i,0,nh
D,(nl+1)*(nh+1)*nb+1+i*(nl+1),,0,,,,,Uz,,,
*ENDDO
*DO,i,0,nh

```

```

D,(nl+1)*(nh+1)*nb+(nl+1)*(i+1),,0,,,,,Uz,,
*ENDDO
D,(nl+1)*(nh+1)*nb+1,,0,,,UX,,,,
*DO,i,1,g
D,(nh+1)*(nl+1)*(nb+1)+i,,0,,,,,UX,,,,
D,(nh+1)*(nl+1)*(nb+1)+i,,0,,,,,UY,,,,
D,(nh+1)*(nl+1)*(nb+1)+i,,0,,,,,Uz,,
*ENDDO

/SOLU
ANTYPE,STATIC,NEW          ! statisch oplossen
SOLVE
FINISH
/SOLU
ANTYPE,BUCKLE,NEW,          ! buckling oplossen
BUCOPT,LANB,3
MXPAND,3
SOLVE
FINISH

/POST1
SET,FIRST
*GET,lamba1,ACTIVE,0,SET,TIME/FREQ

SET,NEXT
*GET,lamba2,active,0,SET,TIME/FREQ

SET,NEXT
*GET,lamba3,active,0,SET,TIME/FREQ

*VWRITE,l,b,h,g,T,adiv,lamba1,lamba2,lamba3    ! naar out.txt schrijven
(F13.5,F13.5,F13.5,F13.5,F13.5,A3,F13.5,F13.5,F13.5)
FINISH

PARSAV,SCALAR,aa
PARSAV,SCALAR,bb
PARSAV,SCALAR,cc
PARSAV,SCALAR,gg
PARSAV,SCALAR,kk

!/CLEAR,NOSTART              !simulatie wissen

PARRES,CHANGE,aa
PARRES,CHANGE,bb
PARRES,CHANGE,cc
PARRES,CHANGE,gg
PARRES,CHANGE,kk

*ENDDO
*ENDDO
*ENDDO
*ENDDO
*ENDDO

*CFCLOS                      ! close file out.txt
*UILLIST,out.txt              ! pop up out.txt

```

*Voor het opstellen van deze code is de code uit het verslag van Mitchel Oorebeek[8] gebruikt.

BIJLAGE 4: CODE ANSYS ROTATIESTIJFHEID OPLEGGINGEN

Hier wordt de code gegeven die door ANSYS gebruikt wordt om de kiplast te bepalen voor een aantal balken waarvoor de lengte, breedte, hoogte en de rotatiestijfheid van de opleggingen variabel zijn. Vervolgens worden deze kiplasten in een .txt bestand geschreven wat weer gebruikt kan worden om in Excel uit te lezen.

```
! Constructie 1
! ANSYS macro
! Genereert een glulam ligger met gelijkmatig verdeelde lijnlast, gaffelopleggingen en verende
kipondersteuning in de drukzone
! eerste versie door P.C.J. Hoogenboom, December 2012
! tweede versie door M. Oorebeek, December 2012
! laatst aangepast door S. Reinders, Juni 2013

*CFOPEN,out.txt                ! out.txt openen
adiv = ' | '
*VWRITE,'lengte','breedte','hoogte','steunen','r',adiv,'lambda1','lambda2','lambda3'      ! naar
out.txt schrijven
(A13,A13,A13,A13,A17,A3,A13,A13,A13)

*DO,aa,0,3
*DO,bb,0,3
*DO,cc,0,3
*DO,rr,1,12

l = 6000+aa*8000                ! lengte [mm]
h = l/22+(l/15-l/22)/3*bb      ! hoogte [mm]
b = h/10+(h/2-h/10)/3*cc      ! breedte [mm]
r = rr*120*l                   ! rotatiestijfheid opleggingen [Nmm/rad]
ec = l/500                     ! maximale zijdelingse excentriciteit van de middendoorsnede
(midden tussen twee steunpunten) voor gelamineerd hout[mm]
nl = 120                       ! aantal elementen in de x richting [-]
nh = 6                         ! aantal elementen in de y richting [-](moet een even getal zijn,
anders staat de oplegging niet in het midden)
nb = 4                         ! aantal elementen in de z richting [-](moet een even getal zijn,
anders staat de lijnlast niet in het midden)
q = 1                          ! lijnlast [N/mm]
kk = r/h/h

/PREP7
SHPP,MODIFY,1,500              ! element slankheid waarschuwing uitstellen

MPTMP,,,,,,,,
MPTMP,1,0                      ! materiaal: orthotroop, waarden voor 2e orde geometrisch
niet lineaire berekening voor houtklasse GL24h
MPDATA,EX,1,,9400
MPDATA,EY,1,,313.33
MPDATA,EZ,1,, 313.33
MPDATA,PRXY,1,,0.372
MPDATA,PRYZ,1,,0.435
MPDATA,PRXZ,1,,0.467
MPDATA,GXY,1,,587.5
MPDATA,GYZ,1,,50
MPDATA,GXZ,1,,587.5
MPDATA,DENS,1,,3.43E-006      ! dichtheid

MPDATA,EX,2,,1e4              ! materiaal steunen
R,1,kk,0,0                    ! Real constants voor steunen
```

```

ET,1,SOLID185                ! element type: 8 node solid
ET,2,LINK180                 ! element type: 3-D Spar

*DO,i,0,nb                   ! plaats knopen balk
*DO,j,0,nh
*DO,k,0,nl
x=k*I/nl
y=j*h/nh
z=i*b/nb+ec*SIN(x*3.1415/I)
N,,x,y,z,,,
*ENDDO
*ENDDO
*ENDDO

*DO,i,0,1                    !plaats knopen rotatieveren
x=i*I
y=h
z=b+10000
N,,x,y,z,,,
z=-10000
N,,x,y,z,,,
y=0
z=b+10000
N,,x,y,z,,,
z=-10000
N,,x,y,z,,,
*ENDDO

TYPE,1
MAT,1
*DO,i,1,nb                   ! plaats elementen balk
*DO,j,1,nh
*DO,k,1,nl
a=k+(j-1)*(nl+1)+(i-1)*(nl+1)*(nh+1)
E,a+1,a+nl+2,a+nl+1,a,a+(nl+1)*(nh+1)+1,a+(nl+1)*(nh+1)+nl+2,a+(nl+1)*(nh+1)+nl+1,a+(nl+1)*(nh+1)
)
*ENDDO
*ENDDO
*ENDDO

TYPE,2
REAL,1
MAT,2
E,1,(nl+1)*(nh+1)*(nb+1)+4   !plaats elementen rotatieveren
E,(nl+1)*(nh+1)-nl,(nl+1)*(nh+1)*(nb+1)+2
E,(nl+1)*(nh+1)*(nb+1)-nl,(nl+1)*(nh+1)*(nb+1)+1
E,(nl+1)*(nh+1)*(nb+1)-(nl+1)*(nh+1)+1,(nl+1)*(nh+1)*(nb+1)+3

E,1+nl,(nl+1)*(nh+1)*(nb+1)+8
E,(nl+1)*(nh+1),(nl+1)*(nh+1)*(nb+1)+6
E,(nl+1)*(nh+1)*(nb+1),(nl+1)*(nh+1)*(nb+1)+5
E,(nl+1)*(nh+1)*(nb+1)-(nl+1)*(nh+1)+1+nl,(nl+1)*(nh+1)*(nb+1)+7

*DO,i,0,nl                   ! plaats lijnlast
F,(nh+1)*(nl+1)*nb/2+nh*(nl+1)+1+i,FY,-q*I/nl
*ENDDO

D,(nl+1)*(nh+1)*(nb/2)+(nl+1)*(nh/2)+1,,0,,,,,UY,,,,
D,(nl+1)*(nh+1)*(nb/2)+(nl+1)*(nh/2)+1,,0,,,,,Uz,,,,

```

```

D,(nl+1)*(nh+1)*(nb/2)+(nl+1)*(nh/2)+1,,0,,,,,UX,,,,

D,(nl+1)*(nh+1)*(nb/2)+(nl+1)*(nh/2)+nl+1,,0,,,,,UY,,,,
D,(nl+1)*(nh+1)*(nb/2)+(nl+1)*(nh/2)+nl+1,,0,,,,,UZ,,,,

*DO,i,1,8
D,(nl+1)*(nh+1)*(nb+1)+i,,0,,,,,UY,,,,      !plaats steunpunten rotatieveren
D,(nl+1)*(nh+1)*(nb+1)+i,,0,,,,,UZ,,,,
D,(nl+1)*(nh+1)*(nb+1)+i,,0,,,,,UX,,,,
*ENDDO

/SOLU
ANTYPE,STATIC,NEW                          ! statisch oplossen
SOLVE
FINISH
/SOLU
ANTYPE,BUCKLE,NEW,                          ! buckling oplossen
BUCOPT,LANB,3
MXPAND,3
SOLVE
FINISH

/POST1
SET,FIRST
*GET,lamba1,ACTIVE,0,SET,TIME/FREQ

SET,NEXT
*GET,lamba2,active,0,SET,TIME/FREQ

SET,NEXT
*GET,lamba3,active,0,SET,TIME/FREQ

*VWRITE,l,b,h,g,r,adiv,lamba1,lamba2,lamba3      ! naar out.txt schrijven
(F13.5,F13.5,F13.5,F13.5,F17.5,A3,F13.5,F13.5,F13.5)
FINISH

PARSAV,SCALAR,aa
PARSAV,SCALAR,bb
PARSAV,SCALAR,cc
PARSAV,SCALAR,rr

/CLEAR,NOSTART                              ! simulatie wissen

PARRES,CHANGE,aa
PARRES,CHANGE,bb
PARRES,CHANGE,cc
PARRES,CHANGE,rr

*ENDDO
*ENDDO
*ENDDO
*ENDDO

*CFCLOS                                      ! close file out.txt
*UILLIST,out.txt                             ! pop up out.txt

```

*Voor het opstellen van deze code is de code uit het verslag van Mitchel Oorebeek[8] gebruikt.