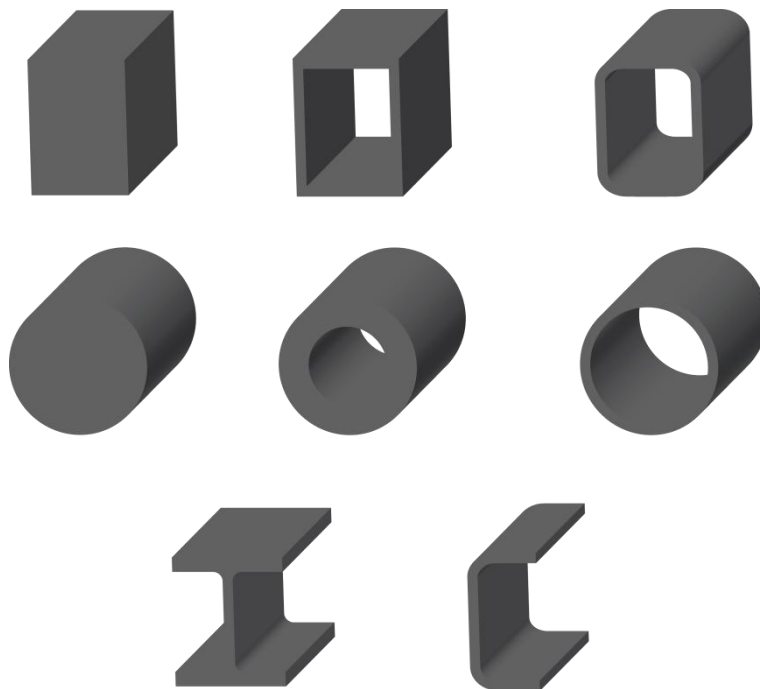




AFSCHUIFSTIJFHEID en MAXIMALE SCHUIFSPANNING

van verschillende soorten doorsneden



Begeleiders: Dr.Ir. P.C.J. Hoogenboom
Ir. R. Abspoel

W.A. van der Mersch
4005570

18 Juni 2012

Voorwoord

In het kader van het Bachelor of Science eindwerk aan de Technische Universiteit Delft is onderzoek gedaan naar de uitkomsten van eerdere onderzoeken naar de afschuifstijfheid en de maximale schuifspanningen van liggers en kolommen. Dit rapport vormt het eindverslag van dit onderzoek. Graag wil ik de heren dr. ir. P.C.J. Hoogenboom en ir. R. Abspoel bedanken voor hun hulp en medewerking bij dit onderzoek.

Delft, juni 2012

Wilco van der Mersch

Samenvatting

Met name bij gedrongen liggers kan afschuiving een belangrijke rol spelen in de dimensionering. Twee grootheden die de afschuiving van een ligger kwantificeren zijn de afschuifstijfheid en de maximale schuifspanning. In zes eindwerken is onderzoek gedaan naar deze grootheden voor een grote hoeveelheid doorsneden (zie figuur 0.1)



Figuur 0.1 Overzicht doorsneden uit eerdere onderzoeken

Er is geen eenduidig overzicht van de nieuwe formules, die voor deze grootheden zijn afgeleid, beschikbaar voor constructeurs. Verder zijn er grote onderlinge verschillen tussen de onderzoeken wat betreft de geldigheid en nauwkeurigheid. De onderzoeken zijn gedaan in een tijdsbestek van 2003 tot en met 2008 en in de loop der tijd is ook de onderzoeksmethode flink verbeterd.

De onderzoeksresultaten die opvallend waren zijn opnieuw bekeken. Invloeden die niet in enkele onderzoeken waren meegenomen en een grotere variatie aan afmetingen leidden tot een nauwkeurigere beschrijving van deze onvolkomenheden. Een standaardmethode om dergelijk onderzoek te doen is geschematiseerd zodat anderen hier in de toekomst tijd mee kunnen winnen.

Wat betreft de afschuifstijfheid van rechthoekige massieve doorsneden waren er relatief weinig profielen onderzocht. Uit dit onderzoek is gebleken dat de nieuwe benaderingsformules uit tabel 0.1 een betere benadering zijn dan de formules uit het onderzoek van J.M. van der Meer².

Tabel 0.1

	voor $\frac{1}{4} \leq \frac{h}{b} < 1$	voor $1 \leq \frac{h}{b} \leq 4$
Oorspronkelijke formule	$\frac{5}{6}GA$	$\frac{5}{6}GA$
Benadering J.M. van der Meer	$\frac{6}{5}GA$	GA
Nieuwe benadering	$< 0.943GA$	$0.943GA\left(\frac{h}{b}\right)^{0.154}$

Liggers met $\frac{h}{b} < 1$ hebben een afschuifstijfheid die richting nul gaat. De plaatwerking van dergelijke liggers kon niet meegenomen worden omdat dat niet mogelijk is met de huidige methode.

Het is opvallend dat de afschuifstijfheid voor hoge smalle liggers groter dan het product van de glijdingsmodulus en het oppervlak. Een fysische verklaring hiervoor ontbreekt nog, maar wel kan worden uitgesloten dat de afschuifvervorming over de lengte varieert. De invloed van de inleiding van de lasten speelt bij gedrongen liggers een belangrijke rol. Bij geen enkel eerder onderzoek is hier aandacht aan besteedt.

Verder blijkt ook dat de maximale schuifspanning van kokers in beide onderzoeken niet te extrapoleren is naar een gelijkwaardige koker. In de onderzoeken worden meerdere grenzen voor de nieuwe formule aangegeven. Deze zijn te beperkt om in het algemeen iets over kokerprofielen te kunnen zeggen.

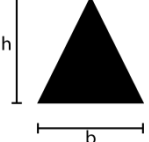
Inhoudsopgave

Voorwoord	2
Samenvatting.....	3
1. Inleiding	5
2. Werkwijze	7
2.1 Overzicht eerdere eindwerken	7
2.2 Aanpak	8
3. Kokerprofielen met rechte en ronde hoeken	9
3.1 Theorie.....	9
3.2 Maximale schuifspanning	9
3.3 Toekomstig onderzoek	11
4 Massieve rechthoekige doorsneden.....	12
4.1 Modelleren hoogste niveau	12
4.2 Eerste modellering.....	13
5 Automatisering van de methode.....	16
5.1 Principe.....	16
5.2 Inleiding van de lasten	16
5.2.1 Hypotheses en werkwijze	17
5.2.2 Resultaten en conclusie	18
5.2.3 Vergelijking eerdere eindwerken.....	19
5.3 Tweede modellering	19
5.3.1 Resultaten	20
5.3.2 Conclusie hoge en vierkante liggers.....	20
5.3.3 Conclusie platte liggers	22
Conclusies	23
Aanbevelingen.....	23
Evaluatie	24
Literatuur.....	25
Bijlage A: Overzicht eerdere Bachelor-eindwerken	26
Bijlage B: Maximale schuifspanning van kokers	27
Bijlage C: Script eerste model.....	28
Bijlage D: Stroomdiagram automatisering.....	29
Bijlage E: Script en resultaten inleiding van de lasten	31
Bijlage F: Scripts tweede modellering	35
Bijlage G: Resultaten tweede modellering	37
Bijlage H: Afschuiving middenplak tweede modellering	43
Bijlage I: Matlab-bestanden van nieuwe formule.....	46
Bijlage J: Overzicht oude formules	47
Bijlage K: Overzicht nieuwe formules	48

1. Inleiding

De afschuifvervorming van korte (gedrongen) elementen speelt een belangrijke rol bij de krachtsverdeling in een constructie. Afschuifvervorming is afhankelijk van de afschuifstijfheid en de schuifspanning. Voor een aantal profielen zijn benaderingsformules beschikbaar om deze grootheden te berekenen. In tabel 1.1 staat een kort overzicht daarvan.

Tabel 1.1 Oorspronkelijke benaderingsformules

Doorsnede	Afschuifstijfheid (GA_{sh})	Maximale schuifspanning (τ_{max})
	$\frac{5}{6} GA$	$\frac{3V}{2A}$
	$2Gth$	$\frac{15V}{14A}$
	$\frac{32}{37} GA$	$\frac{4V}{3A}$
	$\frac{1}{2} GA$	$2\frac{V}{A}$
	GA_{lijf}	$\frac{15V}{14A}$
	$\frac{10h^2}{12h^2 + b^2} GA$	$\frac{3}{4} \sqrt{4 + \frac{b^2}{h^2}} \frac{V}{A}$

In eerdere Bachelor-eindwerken^{2,3,4,5,6,7} is met de eindige-elementenmethode naar een nauwkeurigere benadering van deze eigenschappen voor verschillende soorten doorsneden en profielen gezocht. Hoewel het niet bekend is in hoeverre de formules die met deze methode afgeleid zijn overeenkomen met de werkelijkheid is aangenomen dat ze een nauwkeuriger beeld van de werkelijkheid geven dan de formules uit tabel 1.1

De oorspronkelijke formules zijn hoogstwaarschijnlijk met een andere methode dan de eindige-elementenmethode ontwikkeld. Omdat dit onderzoek zich beperkt tot de geldigheid van de eindige-elementenmethode wordt het feit dat resultaten hiervan af (kunnen) wijken van de werkelijkheid buiten beschouwing gelaten. Dit valt namelijk niet in het kader van deze onderzoeksvraag. Omdat deze beperking voor het gehele onderzoek geldt, wordt deze in het verdere verloop van dit verslag niet telkens uitgebreid besproken.

Veel van deze formules zijn onderling niet met elkaar te vergelijken. Daarmee wordt bedoeld dat er tussen de formules grote verschillen bestaan met betrekking tot nauwkeurigheid en vorm. Verder

ontbreekt het aan een eenduidig overzicht waar constructeurs in de praktijk gebruik van kunnen maken.

Daarom zijn in hoofdstuk 2 de verschillen tussen de onderzoeken in een overzicht naar voren gebracht. De meest opvallende verschillen zijn nader onderzocht (zie paragraaf 2.2). In de daaropvolgende hoofdstukken worden deze onderdelen één voor één behandeld.

2. Werkwijze

De eindwerken van de eerdere onderzoeken van J.M. van der Meer², R. Spaan^{1,3}, J.M. de Wit⁷, R. Velner⁴, B.M. van de Weerd⁶ en L. Voormeeren⁵ bevatten onderling veel verschillen in aanpak en methodiek. Daarom is eerst een overzicht van de verschillende eindwerken gemaakt en vervolgens is er aan de hand van dat overzicht een gedetailleerdere aanpak geformuleerd van onderdelen uit die onderzoeken die verder onderzocht dienen te worden.

2.1 Overzicht eerdere eindwerken

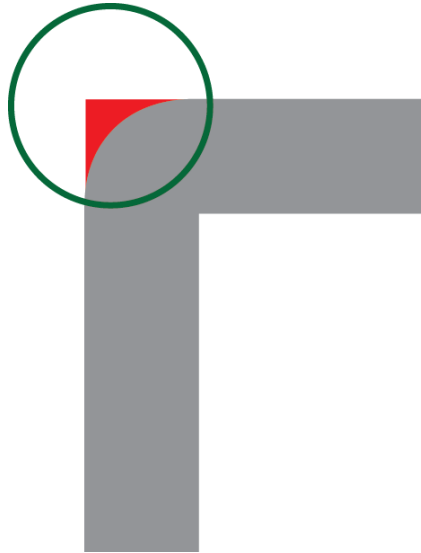
Van 2003 tot en met 2008 hebben een zestal studenten onderzoek gedaan naar de afschuifstijfheid en de maximale schuifspanning van elk een andere doorsnede. In bijlage A is een overzicht te zien van deze eindwerken. De belangrijkste formules volgend uit hun resultaten zijn in tabel 2.1 weergegeven.

Tabel 2.1^{2,3,4,5,6,7}

Doorsnede	Afschuifstijfheid (GA_{sh})	Voorwaarde formule	Soort spanning	Maximale spanning	Voorwaarde formule
	GA	$h=3b$	Schuifspanning (τ)	$\frac{3}{2} \frac{V}{A}$	
	$\frac{6}{5}GA$	$h=b$			
	$\frac{6}{5}GA$	$h = \frac{b}{3}$		$(0.2 \frac{b}{h} + 1.5) \frac{V}{A}$	$b>h$
	$\frac{1}{2}GA$	$0 < \frac{t}{r} \leq 0.2$	Schuifspanning (τ)	$(2 + \frac{t}{r}) \frac{V}{A}$	
	$(\frac{15}{16} \frac{t}{r} + \frac{5}{16})GA$	$0.2 < \frac{t}{r} < 1$			
	$\frac{5}{4}GA$	$\frac{t}{r}=1$		$\frac{3}{2} \frac{V}{A}$	
	$2t(h + \frac{3}{4}t)GA$	$0 < \frac{t}{b} \leq 1/2, \frac{1}{2} < \frac{h}{b} < \infty$	Schuifspanning (τ)	$(\frac{13}{8} - \frac{4b}{25h} + \frac{8b^2}{25h^2} + \cos \frac{2t\pi}{b} (-\frac{9}{200} - \frac{4b}{25h} + \frac{8b^2}{25h^2})) \frac{V}{A}$	
	$Gt(2.26h+0.42r+0.74t-0.68b)$	$\frac{b}{h} \leq 1.75, \frac{r}{t} < 4, 0.05 \leq \frac{t}{h} \leq 0.2$	Schuifspanning (τ)	$\frac{V}{t(1.88h-1.44t-0.43r)} (1 - 0.066 \frac{h}{b} - 0.01 \frac{t}{r})$	$\frac{b}{h} \leq 1.75, \frac{r}{t} < 4, 0.05 \leq \frac{t}{h} \leq 0.2$
	$Gt_w(h + t_f)(\frac{23}{25} + \frac{1}{5} \frac{b}{h} + \frac{1}{18} \frac{r}{t_w})$		Von Mises (τ en σ)	$\sqrt{3} \frac{V}{t_w(h-2t_f)} (\frac{25}{26} + \frac{1}{35} \frac{h}{b} + \frac{1}{10} \frac{t_w}{t_f})$	
	$Gt(h-2t)(\frac{157}{200} - \frac{77}{11} \frac{h}{b} - \frac{689}{100} \frac{b}{h} + \frac{7}{20} \frac{b}{t} + \frac{1099}{50} \frac{t}{b} - \frac{683}{5000} \frac{r_2}{t})$		Von Mises (τ en σ)	$\frac{V}{t(h-\frac{723}{250}t)} (\frac{1141}{1000} - \frac{179}{5000} \frac{h}{b} + \frac{39}{2500} \frac{r_2}{t})$	

2.2 Aanpak

Uit het overzicht zijn grofweg twee zaken die opvallen. De eerste is de vraag in hoeverre er een verschil bestaat in de schuifspanning tussen de kokers met ronde en met rechte hoeken. Wanneer de buitenafrondding in de formule van de koker met ronde hoeken gelijk aan de dikte gesteld wordt (zie figuur 2.1) dan is alleen het met rood gearceerde deel een verschil tussen beide formules. Omdat schuifspanning geen scherpe hoek om gaat zou dit deel niet uit mogen maken. In hoofdstuk 3 zal hier verder aandacht aan worden besteed.

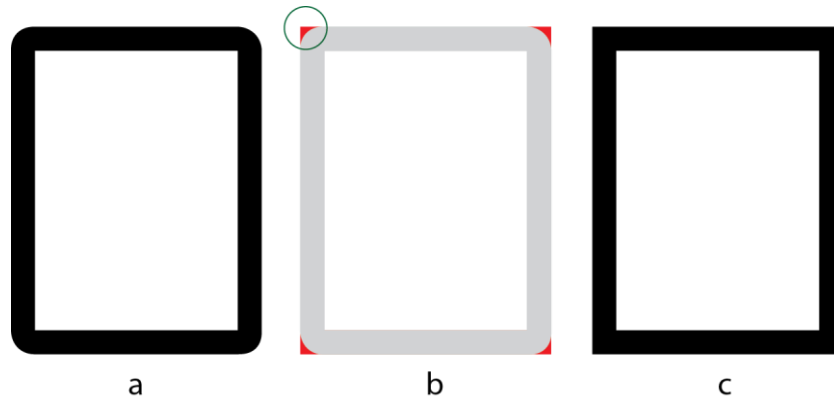


Figuur 2.1 Buitenhoek bij kokerprofiel

Ten tweede zijn er van de rechthoekige massieve profielen relatief weinig variaties in afmetingen onderzocht. De geldigheid van de formules uit tabel 2.1 is daarmee een stuk kleiner. Verder valt het op dat de afschuifstijfheid van deze profielen groter dan het product van de glijdingsmodulus en het oppervlak is. In hoofdstuk 4 en 5 is dit nader onderzocht.

3. Kokerprofielen met rechte en ronde hoeken

In dit hoofdstuk eerst het theoretische verschil tussen de onderzoeken naar kokers met rechte hoeken en kokers met ronde hoeken verder uitgelegd. Vervolgens zijn de formules uit deze onderzoeken onderling vergeleken.



Figuur 3.1 Verschil tussen kokers met ronde en kokers met rechte hoeken

3.1 Theorie

Uit de eindwerken van J.M. de Wit⁷ en R. Velner⁴ zijn nieuwe benaderingsformules naar voren gekomen voor zowel de afschuifstijfheid als de maximale schuifspanning van kokerprofielen. Het onderzoek van De Wit is gericht op de kokerprofielen met rechte hoeken (figuur 3.1c) terwijl het onderzoek van Velner gericht is op kokerprofielen met ronde hoeken (figuur 3.1a). Het verschil tussen beide profielen is omcirkeld in figuur 3.1b.

De invloed van dit gearceerde deel zou bij de maximale schuifspanning nagenoeg te verwaarlozen moeten zijn. Omdat schuifspanning als het ware door de doorsnede loopt heeft het materiaal in een dergelijke buitenhoek logischerwijs geen invloed op de schuifspanning. Er zou tussen de formule voor maximale schuifspanning van beide kokers, in het geval van figuur 3.1, geen verschil moeten bestaan.

3.2 Maximale schuifspanning

Het onderzoek van J.M. de Wit⁷ heeft niet één duidelijke formule opgeleverd. In het onderzoek is met het curvefitting-programma DataFit een formule ontwikkeld die aansluit bij de modelresultaten (formule 3.1). Omdat deze formule dermate ingewikkeld is heeft De Wit een tweede en eenvoudigere formule opgesteld (formule 3.2). In zijn conclusie wordt de eenvoudige formule als nieuwe benaderingsformule gepresenteerd. Uit het verslag blijkt niet hoe De Wit aan deze formule gekomen is en daarom worden hier zowel de eenvoudige als de curvefitting-formule ter vergelijking gebruikt.

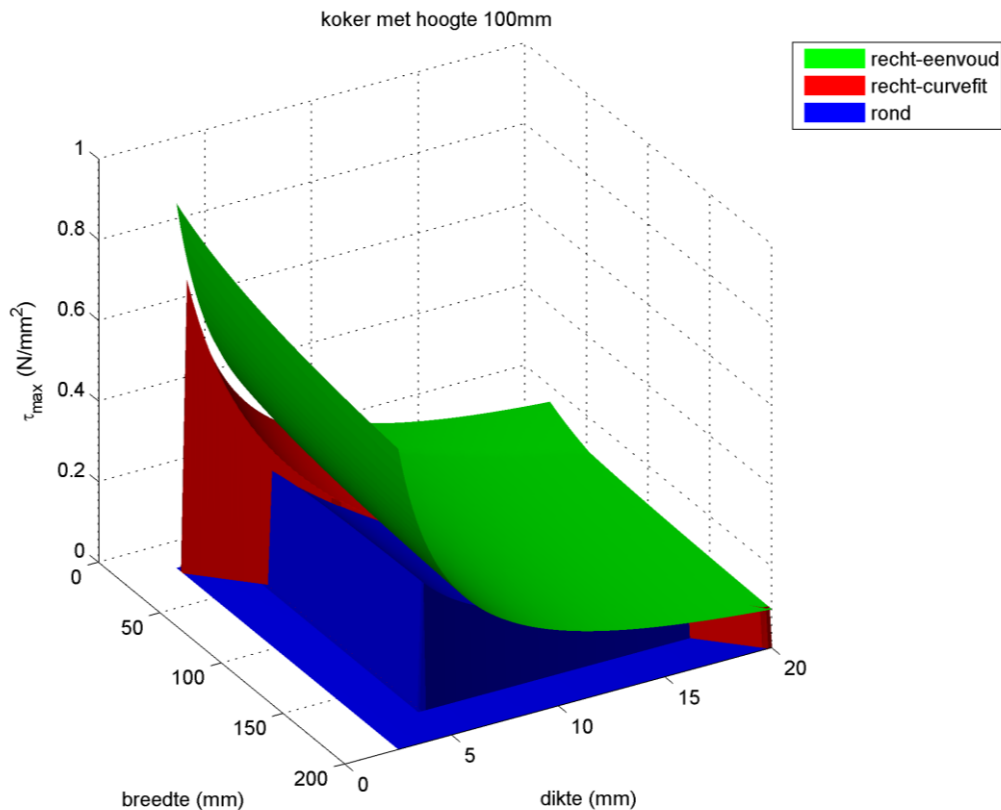
Formule 3.1 t/m 3.3 Maximale schuifspanning van kokerprofielen^{4,7}

Rechte hoeken (curvefit): $\left(\frac{13}{8} - \frac{4b}{25h} + \frac{8b^2}{25h^2} + \cos \frac{2\pi}{b} \left(-\frac{9}{200} - \frac{4b}{25h} + \frac{8b^2}{25h^2} \right) \right) \frac{V}{A}$

Rechte hoeken (eenvoudig): $\frac{15}{14} \frac{V}{2th} + \frac{1}{2} \frac{V}{A}$ voor $h < \frac{25b}{3} - \frac{50t}{3}$

$\frac{1}{10} \frac{V}{A}$ voor $h \geq \frac{25b}{3} - \frac{50t}{3}$

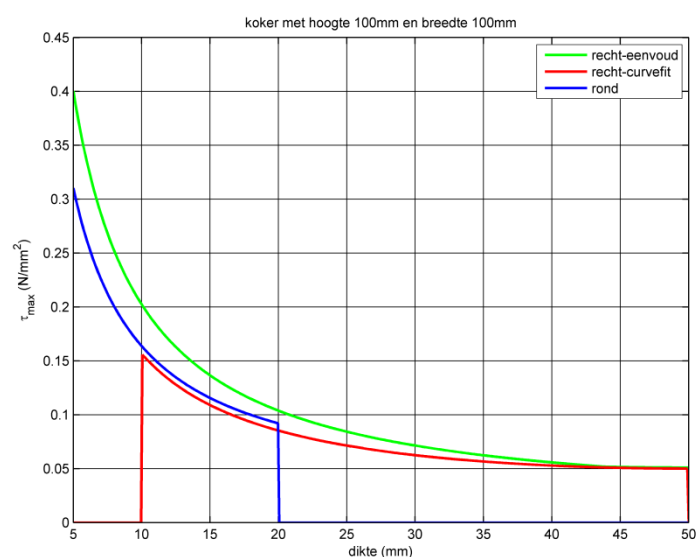
Ronde hoeken: $\frac{V}{t(1.88h - 1.44t - 0.43r)} \left(1 - 0.066 \frac{h}{b} - 0.01 \frac{t}{r} \right)$ voor $\frac{b}{h} \leq 1.75$ en $\frac{r}{t} < 4$ en $0.05 \leq \frac{t}{h} \leq 0.2$



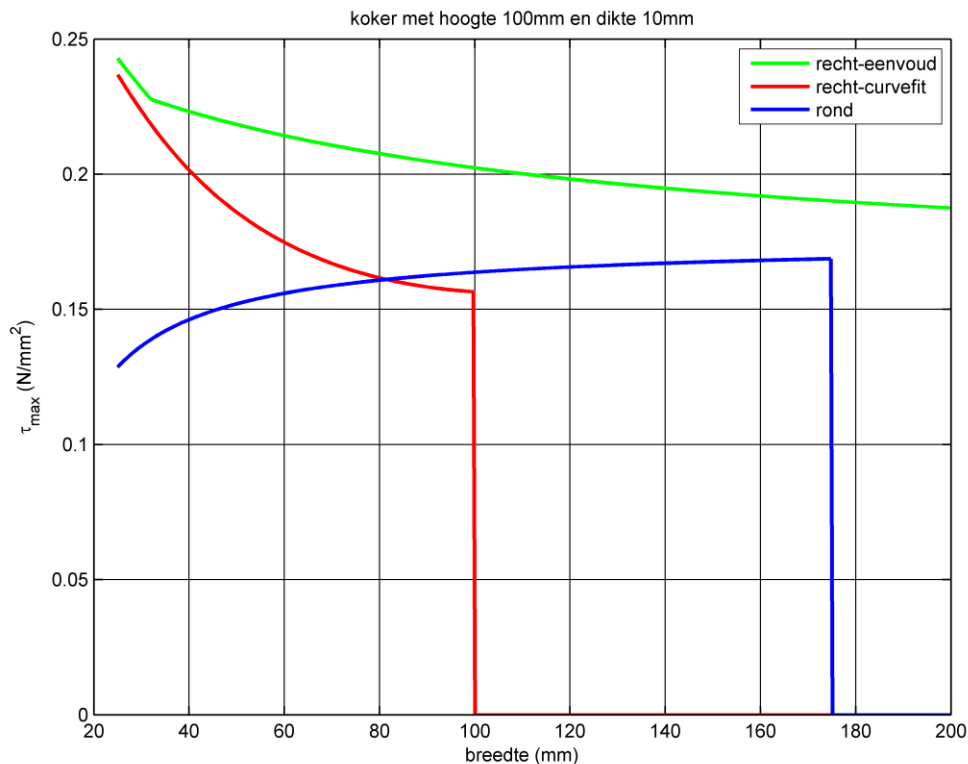
Figuur 3.2 Plot van de formules 3.1 t/m 3.3

De formule van kokerprofielen met ronde hoeken is afkomstig uit het onderzoek van R. Velner⁴. De straal r in deze formule is de buitenstraal van de koker. Om beide formules met elkaar te kunnen vergelijken zijn de formules 3.1 t/m 3.3 uitgezet tegen de dikte en breedte in figuur 3.2. De straal van de kokers met ronde hoeken is gelijk genomen aan de dikte zodat de situatie uit figuur 3.1 verkregen wordt.

Uit figuur 3.2 blijkt dat de verwachting dat alle drie de kokerformules dezelfde maximale schuifspanning zouden opleveren onjuist is. Om het verschil tussen de formules duidelijker zichtbaar te maken zijn in zowel de breedte- als de dikte-as plakjes uit bovenstaande afbeelding gesneden (zie figuur 3.3, 3.4 en bijlage B). De plakjes zijn gemaakt op de plaatsen die De Wit heeft onderzocht. In de figuren is de curvefitting-formule alleen weergegeven binnen de onderzochte grenzen. De andere twee formules zijn alleen geplot binnen de aangegeven grenzen.



Figuur 3.3 Maximale schuifspanning van kokers tegen de dikte



Figuur 3.4 Maximale schuifspanning van kokers tegen de breedte

Opvallend genoeg blijkt de curvefitting-formule bij een constante breedte alleen enkele Newtons per vierkante millimeter lager te zijn dan de “ronde”-formule (zie figuur 3.3). Dit verschil is zodanig klein dat de nauwkeurigheid van de formules het verschil kan verklaren (zie bijlage B).

De maximale schuifspanning tegen de breedte (figuur 3.4) laat echter een heel ander beeld zien. Geen van de drie formules vertoont ook maar enige overeenkomst met een andere formule. De afwijkingen in de maximale schuifspanning zijn zodanig groot dat op basis van dit figuur geconstateerd kan worden dat minstens één van beide onderzoeken inconsistenties vertoont.

3.3 Toekomstig onderzoek

De formules uit de onderzoeken van J.M. de Wit⁷ en R. Velner⁴ zijn onder bepaalde omstandigheden niet gelijk terwijl dat volgens de theorie wel het geval zou behoren te zijn. Concreet betekent dit dat in ieder geval één van beide onderzoeken over gedaan moet worden met betrekking tot de maximale schuifspanning.

Zowel De Wit als Velner hebben al geconcludeerd dat zij graag meer en nauwkeuriger onderzoek hadden willen doen naar de invloed van de afrondingsstralen op de krachtsverdeling in kokerprofielen. Omdat een dergelijk onderzoek te omvangrijk is zal een andere student dit in de toekomst als onderwerp voor zijn/haar eindwerk kunnen gebruiken.

Het ligt in de lijn der verwachting dat dan eerst het onderzoek van De Wit nader bestudeert wordt. Dat onderzoek omvat namelijk een stuk minder profielen dan het onderzoek van Velner (zie bijlage A). De geldigheid van de formules uit het eindwerk van De Wit is daarmee te klein om in de praktijk te gebruiken.

4 Massieve rechthoekige doorsneden

Het onderzoek dat J.M. van der Meer² naar de afschuifstijfheid en de maximale schuifspanning in rechthoekige doorsneden gedaan heeft bevat opvallende resultaten. Verder hebben deze resultaten een beperkte geldigheid omdat er slechts 10 verschillende profielafmetingen onderzocht zijn. In dit hoofdstuk is een andere modellering toegepast die nauwkeurigere resultaten oplevert.

4.1 Modellering hoogste niveau

Bij de modellering van dit profiel is gebruik gemaakt van het eindige-elementenpakket ANSYS⁸. Om het gedrag bij afschuiving te kunnen analyseren is het model dermate opgebouwd dat de ligger een constante dwarskracht ondervindt en er in het midden van de ligger geen translatie op treedt. Doordat de translatie verhinderd wordt is deze niet meer maatgevend en kan uit het model direct de vervorming ten gevolge van de dwarskracht worden afgelezen.

Een constante dwarskracht betekent dat er een lineair verlopend moment op de ligger is aangebracht. Een dergelijke momentenverdeling ontstaat door aan één kant een positief moment en aan de andere kant een even groot negatief moment op de ligger te zetten (zie figuur 4.1a). Deze momenten zijn gemodelleerd door aan beide uiteinden van de ligger een krachtenkoppel aan te brengen. Deze krachten hebben de volgende waarde:

Formule 4.1

$$M = F_h h$$

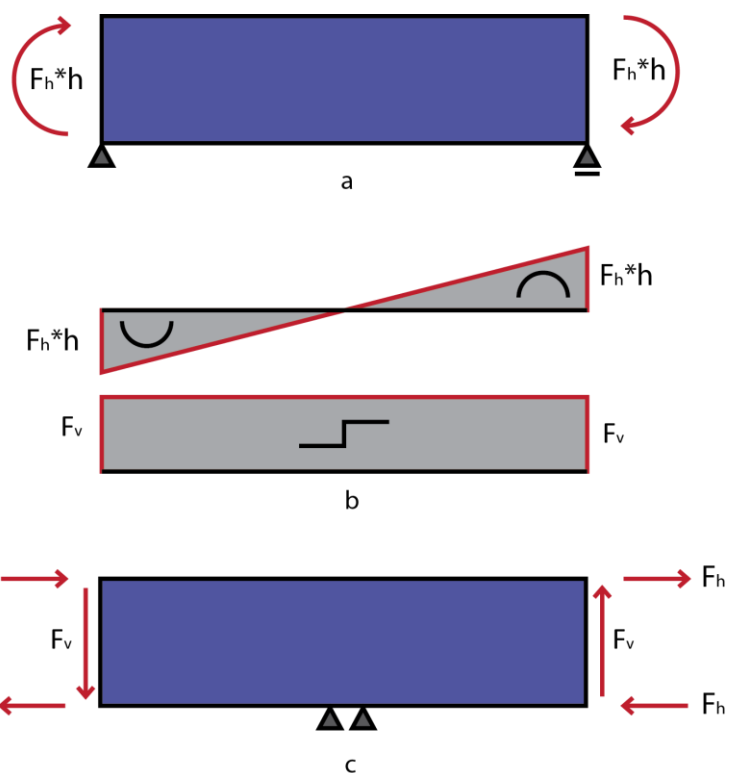
De dwarskracht en tevens ook de oplegreacties die ten gevolge van de momenten ontstaan zijn (zie figuur 4.1b):

Formule 4.2

$$F_v = V = \frac{2M}{l} = \frac{2F_h h}{l}$$

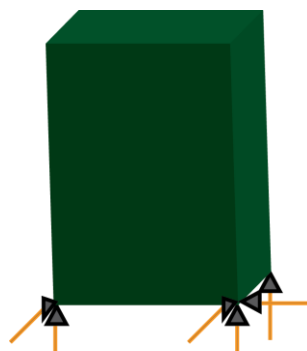
Om translatie in het midden te verhinderen zijn de opleggingen vlak naast elkaar in het midden aangebracht. De eerder genoemde krachtsverdeling is gerealiseerd door aan beide uiteinden een dwarskracht in de vorm van puntlasten op de ligger te zetten (zie figuur 4.1c). Door deze puntlasten zijn de oplegreacties verwaarloosbaar klein.

Uit eerder onderzoek is gebleken dat een lengte van 400 mm voldoende is om de invloed van de inleiding van de krachten te verwaarlozen. In Hoofdstuk 5 is dit gecontroleerd. De horizontale kracht F_h is gelijk gesteld aan 675 N.

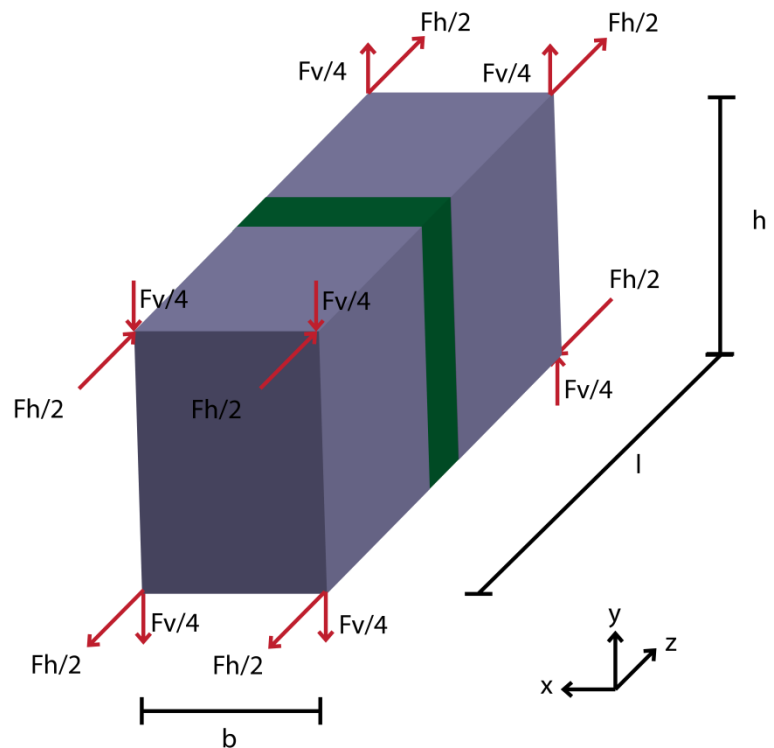


Figuur 4.1 Krachtenverdeling in de ligger

Uiteindelijk ziet het model eruit zoals figuur 4.2. In het model zijn de tweedimensionale krachten uit figuur 4.1 vertaald naar de driedimensionale ruimte. Een driedimensionaal model heeft zes vrijheidsgraden en er zijn dus zes oplettingen nodig om het model statisch bepaald te maken. De oplettingen zijn weergegeven in figuur 4.3.



Figuur 4.3 Middelste plak



Figuur 4.2 Driedimensionale modellering van de ligger

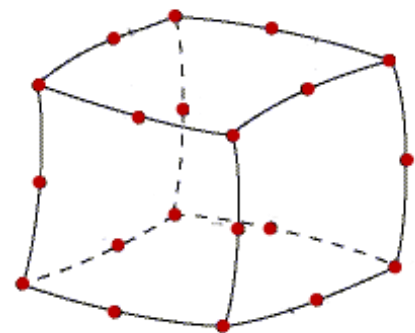
Het model bestaat uit staal. Dat betekent dat de representatieve elasticiteitsmodulus (E) gelijk is aan $2.1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$ en de dwarscontractiecoëfficiënt (ν) gelijk is aan 0.3. Voor het genereren van een mesh is het 20-knoopselement SOLID95 gebruikt (zie figuur 4.4).

4.2 Eerste modellering

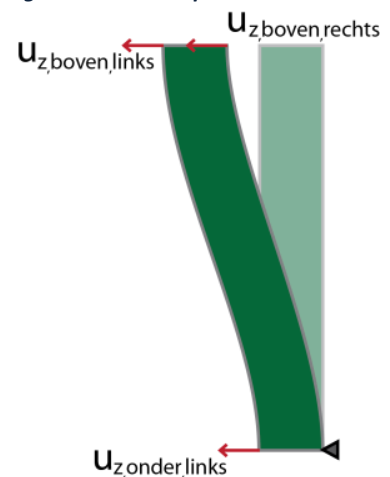
Het eerste model is een eenvoudig model, zodat hiermee de methode geverifieerd is. Daarom is er bij het eerste model alleen een ligger met hoogte 200 millimeter, breedte 70 millimeter en lengte 400 millimeter gemodelleerd. Bijbehorend script is te vinden in bijlage C. De resultaten zijn geplott in figuur 4.5 en weergegeven in tabel 4.1

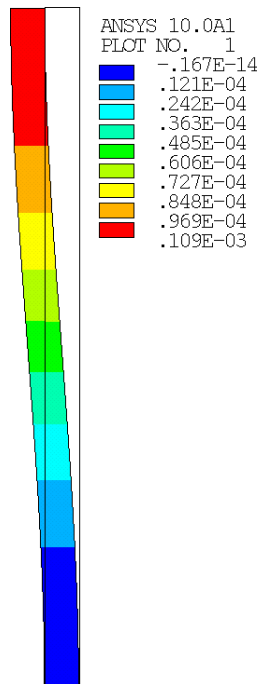
Tabel 4.1 Resultaten

$u_{z,\text{boven,links}}$	$1.090255660 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$
$u_{z,\text{boven,rechts}}$	$1.090255660 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$
$u_{z,\text{onder,links}}$	$-1.671869820 \cdot 10^{-15} \text{ mm}$



Figuur 4.4 20-knoopselement SOLID95





Figuur 4.5 Verplaatsing van de middenplak

Met behulp van de verplaatsing aan de bovenzijde is de afschuifhoek γ bepaalt. Uit deze afschuifhoek is vervolgens de afschuifstijfheid GA_{sh} berekent.

Formule 4.3, 4.4 en 4.5

$$u_{totaal} = \frac{u_{z,boven,links} + u_{z,boven,rechts}}{2} - \frac{1}{2}u_{z,onder,links}$$

$$\gamma = \frac{u_{totaal}}{h}$$

$$GA_{sh} = \frac{V}{\gamma}$$

Invullen geeft:

$$u_{totaal} = \frac{1.09 * 10^{-4} + 1.09 * 10^{-4}}{2} - \frac{1}{2} * -1.67 * 10^{-15} = 1.090255 * 10^{-4} \text{ mm}$$

$$GA_{sh} = \frac{Vh}{u_{totaal}} = \frac{675 * 200}{1.09 * 10^{-4}} = \mathbf{1.24 * 10^9 \text{ N}}$$

Het model met dezelfde afmetingen in het onderzoek van Van der Meer² heeft als resultaat een afschuifstijfheid van $\mathbf{1.17 * 10^9 \text{ N}}$. De afwijking tussen dat resultaat en de formule van Van der Meer is:

Formule 4.6

$$GA_{sh} = \frac{6}{5} \frac{2.1 * 10^5}{2(1 + 0.3)} (70 * 200) = \mathbf{1.36 * 10^9 \text{ N}}$$

$$\frac{1.36 * 10^9 - 1.17 * 10^9}{1.36 * 10^9} * 100\% = 14.0\%$$

Ter vergelijking, de oorspronkelijke formule geeft de volgende afschuifstijfheid:

Formule 4.7

$$GA_{sh} = \frac{5}{6} GA = \frac{5}{6} \frac{E}{2(1 + \nu)} (bh)$$

$$GA_{sh} = \frac{5}{6} \frac{2.1 * 10^5}{2(1 + 0.3)} (70 * 200) = \mathbf{0.94 * 10^9 \text{ N}}$$

Alle drie de afschuifstijfheden wijken sterk af van de afschuifstijfheid volgens de oorspronkelijke formule (formule 4.7). Een verklaring hiervoor is gerelateerd aan de vraag in hoeverre ANSYS de werkelijkheid benadert. In dit onderzoek is dat buiten beschouwing gelaten.

Het verschil tussen de gemodelleerde afschuifstijfheid en de afschuifstijfheid volgens de formule van Van der Meer is gelijk aan:

$$\frac{1.24 * 10^9 - 1.17 * 10^9}{1.24 * 10^9} * 100\% = 5.6\%$$

Verklaringen voor dit verschil zijn de keuze voor een 20-knoopselement in plaats van een 8-knoopselement of een fijnere mesh. In het algemeen levert een 20-knoopselement zoals SOLID95 een nauwkeuriger beeld van de vervormingen per element dan een 8-knoopselement zoals SOLID45. Hetzelfde geldt ook voor een fijnere mesh.

Wanneer een ligger uit meer elementen bestaat hoe beter de krachtsverdeling benaderd wordt. In een ideaal model wordt de krachtsverdeling bepaald door de samenwerking tussen de kleinste deeltjes van een ligger. Een dergelijk model kan alleen in een laboratorium-proef gedaan worden. De mesh die hier gebruikt is, is 37x3x9 (lxbxh) wat in de lengte nauwkeuriger is dan de mesh 8x8x8 van Van der Meer.

Verder is de ligger op een andere manier opgelegd dan de ligger van Van der Meer. Omdat de uiteindelijke krachten in de ligger hetzelfde zijn heeft dit verschil geen effect op de resultaten.

Hieruit wordt geconcludeerd dat de afschuifstijfheid van dit model een betere benadering van de werkelijkheid is dan de afschuifstijfheid die Van der Meer berekend heeft. Het is echter opvallend dat de afschuifstijfheid uit het model een factor (α) groter dan 1 heeft ten opzichte van het product GA.

$$GA = \frac{2.1 * 10^5}{2(1 + 0.3)} (70 * 200) = 1.13 * 10^9 N$$

$$\alpha = \frac{GA_{sh}}{GA} = \frac{1.24 * 10^9}{1.13 * 10^9} = 1.0973$$

$$\alpha_{van\ der\ meer} = \frac{GA_{sh, van\ der\ meer}}{GA} = \frac{1.17 * 10^9}{1.13 * 10^9} = 1.0347$$

Ook in het geval van de afschuifstijfheid die Van der Meer berekend heeft is deze factor groter dan 1. Met name het feit dat α een waarde groter dan één kan hebben is erg opvallend.

5 Automatisering van de methode

In enkele eerdere onderzoeken is gebruik gemaakt van een geautomatiseerde methode om een grote hoeveelheid modellen in één keer uit te voeren. Met behulp van dit principe is voor de afschuifstijfheid van massieve rechthoekige doorsneden een nauwkeurigere benaderingsformule afgeleid.

5.1 Principe

Omdat er juist naar een grotere geldigheid voor de formules van de afschuifstijfheid en maximale schuifspanning gezocht is, is er bij de volgende modelleringen gebruik gemaakt van een BASH-script (Bourne Again SHell). Met behulp van Cygwin¹⁰ zijn alle combinaties verschillende variabelen achtereenvolgens volledig automatisch onderzocht (zie bijlage D).

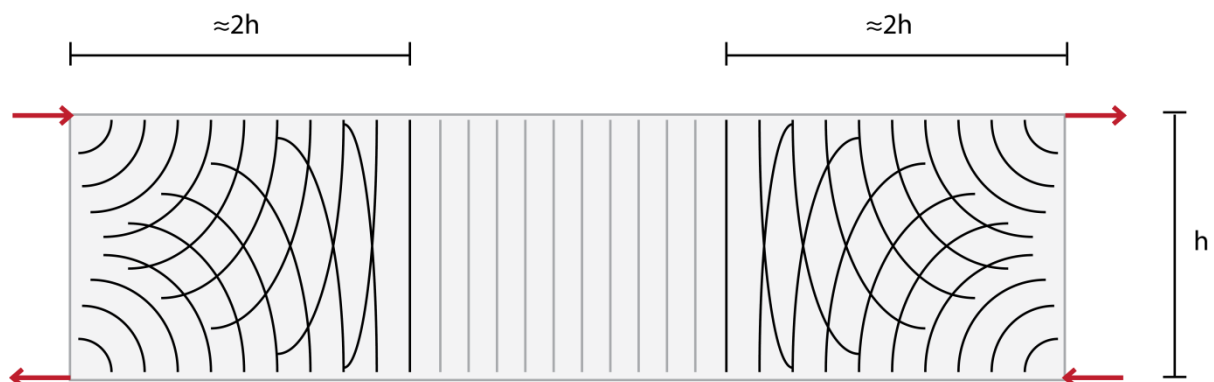
Cygwin is een opensource-programma waarmee via commandoregels opdrachten kunnen worden uitgevoerd. Dit programma vereist geen tussenkomst van de gebruiker, de bestanden zijn stukken kleiner en kleine veranderingen kunnen makkelijk worden doorgevoerd vergeleken met de gebruikelijke manier van modelleren.

Uit eerdere onderzoeken is gebleken dat een dergelijke automatisering het aantal modellen kan vertienvoudigen. Uiteindelijk komt dit de nauwkeurigheid, geldigheid en reproduceerbaarheid ten goede. Het principe van deze manier van modelleren en de interactie tussen de programma's is weergegeven in bijlage D.

5.2 Inleiding van de lasten

Uit het onderzoek van Van der Meer² is gebleken dat vierkante en hoge rechthoekige een afschuifstijfheid van $1.2GA$ hebben. Dit is erg opvallend, omdat de resulterende stijfheid groter is dan de theoretische stijfheid. Het lijkt dus alsof er stijfheid van een groter oppervlak dan het oppervlak van de doorsnede aanwezig is. Dit is fysisch niet verklaarbaar.

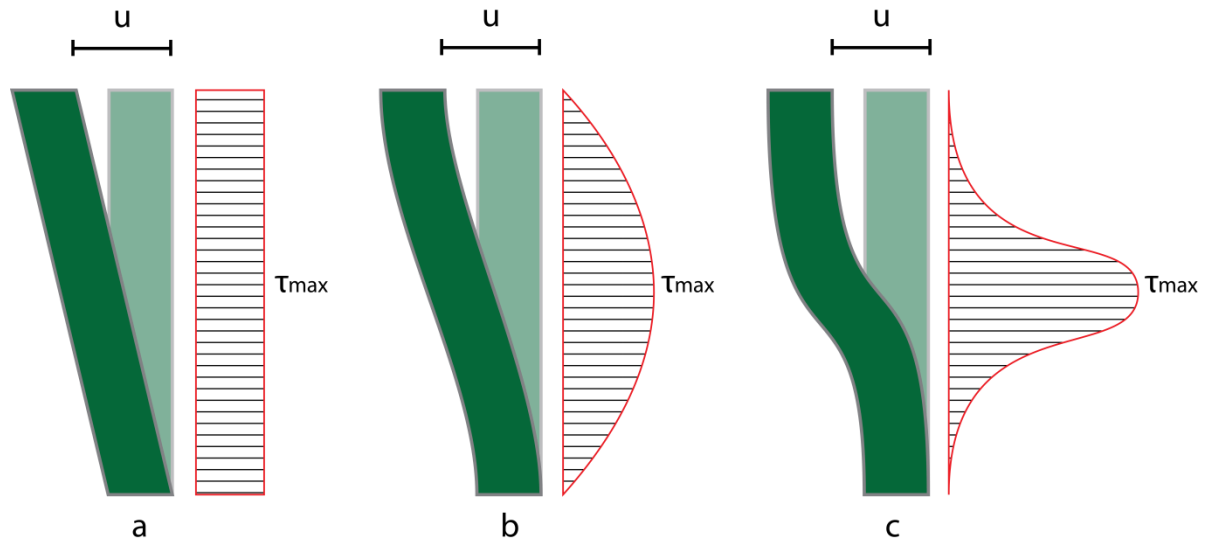
Bij het eerste model is gekozen om de krachten met puntlasten in de constructie te leiden. De invloed van de inleiding van de puntlasten kan tot ongeveer twee keer de hoogte over de lengte van de ligger merkbaar zijn (zie figuur 5.1). Omdat de ligger uit het eerste model slechts een totale lengte van twee keer de hoogte heeft is het zeer waarschijnlijk dat in het midden van de ligger de krachten niet zodanig gelijk verdeeld zijn dat er zuivere afschuiving op treedt.



Figuur 5.1 Verstoring door de inleiding van de lasten

5.2.1 Hypotheses en werkwijze

Beide problemen, namelijk de factor groter dan één en de invloed van de totale lengte, zijn onderzocht door een relatief lange ligger te nemen en op verschillende plekken de oplegging met de “middenplak” de modelleren. Uit elk van deze modellen volgt een afschuifstijfheid.



Figuur 5.2 Verschillende soorten afschuiving

Een mogelijke verklaring voor het feit dat α groter dan één is, is dat de S-vorm, die bij zuivere afschuiving ontstaat, niet overal hetzelfde is. De totale verplaatsing tussen boven en onderkant van de ligger is in dit geval gelijk, maar het tussenliggende deel vervormt op een andere wijze (zie figuur 5.2a t/m c). Doorgaand op deze hypothese zal de afschuifstijfheid over de ligger variëren om de ligger in zijn geheel in evenwicht te laten zijn.

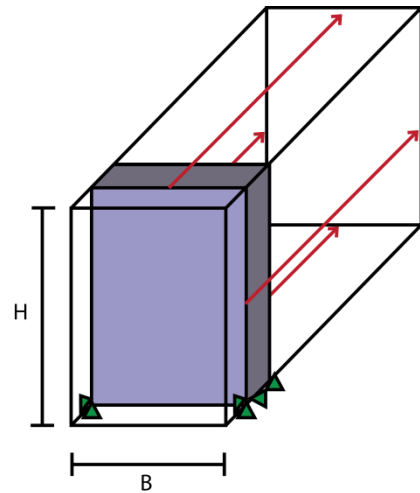
Zoals in figuur 5.1 te zien is moet de ligger een zekere verhouding van lengte tot de hoogte hebben zodat in het midden van de ligger de manier waarop de momenten op de ligger zijn aangebracht niet merkbaar is. Om met zekerheid te kunnen vaststellen dat de afschuifstijfheid uit het model niet afhankelijk is van de locatie van de doorsnede is een ligger met een lengte-hoogteverhouding van zeven gekozen.

De invloed van de inleiding van de krachten is met name merkbaar via de uitzonderlijk hoge spanningsconcentraties bij de plekken waar de puntlasten op de ligger staan. Vanwege deze spanningsconcentraties treden daar lokaal zeer hoge verplaatsingen op. Dergelijke verplaatsingen zullen merkbaar zijn in lokale veranderingen van de afschuifstijfheid.

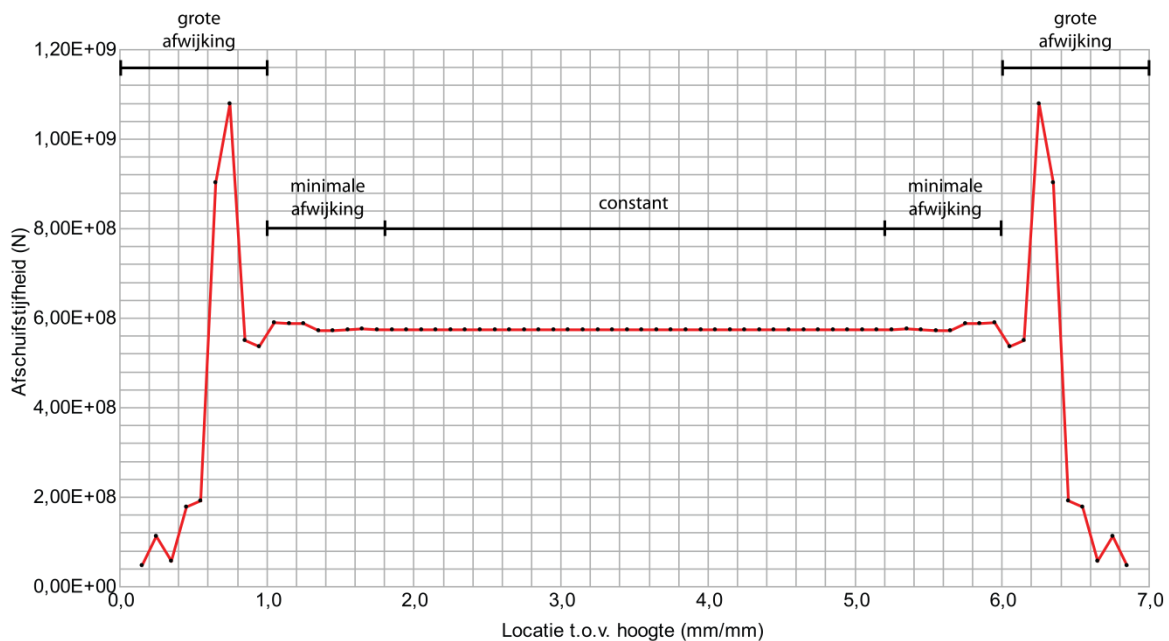
Door op verschillende locaties in de ligger een plak te nemen en daar de afschuifstijfheid van te bepalen kan worden bekeken of de afschuifstijfheid varieert over de lengte. Daaruit kan worden geconcludeerd hoe groot het gebied is waar de inleiding van de lasten de afschuifstijfheid beïnvloed.

5.2.2 Resultaten en conclusie

In bijlage E staat het script waarmee telkens op een andere locatie een plak uit de ligger gehaald is. Om translatie te verhinderen zijn de opleggingen met de plak mee verplaatst (zie figuur 5.3). De resultaten zijn geplot in figuur 5.4.



Figuur 5.3 Verplaatsing van de middenplak



Figuur 5.4 Afschuifstijfheid van een ligger met breedte 70mm, hoogte 100mm en lengte 700mm

Uit de figuur is duidelijk zichtbaar dat de invloed van de inleiding van de puntlasten vooral merkbaar is op een afstand gelijk aan de hoogte van de ligger. Vanaf een afstand van twee maal de hoogte van de ligger over de lengte is de afschuifstijfheid constant tot en met het midden. De afwijkingen van de afschuifstijfheid aan de randen zijn te wijten aan de modellering in ANSYS.

Beperkingen in de fijnheid van de mesh zorgen ervoor dat er een keuze gemaakt is tussen de fijnheid in de lengte richting en de fijnheid in de doorsnede. De fijnheid in de doorsnede bepaalt de nauwkeurigheid van de afschuifstijfheid in een doorsnede terwijl de fijnheid over de lengte de grootte van het verstoringgebied van de inleiding van de krachten bepaalt.

Theoretisch is te verwachten dat de afschuifstijfheid constant is over de gehele lengte. Deze resultaten laten zien dat dit inderdaad zo is met als beperking de modellering in ANSYS. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de afschuifstijfheid niet veranderd over de lengte van de ligger mits deze ligger lang genoeg is.

5.2.3 Vergelijking eerdere eindwerken

Uit deze conclusie is een andere, nog belangrijkere conclusie te trekken, namelijk dat juist voor de liggers waarbij de afschuifstijfheid een rol speelt, de korte liggers, de afschuifstijfheid bij bepaalde modelleringen sterk afhankelijk is van de manier waarop de krachten worden ingeleid in de ligger.

Tabel 5.1 Invloed van de inleiding van de lasten bij eerdere eindwerken

Profiel	Naam	maximale $\frac{\text{Lengte}}{\text{Hoogte}}$ – of $\frac{\text{Lengte}}{\text{Breedte}}$ verhouding
	J.M. van der Meer	4
	R. Spaan	5
	J.M. de Wit	4
	R. Velner	4
	B.M. van de Weerd	3
	L. Voormeeren	≈4

Naast het onderzoek van Van der Meer² naar massieve rechthoekige doorsneden blijkt dat ook bij de meeste andere onderzoeken de verhouding van de lengte over de hoogte niet veel meer dan vier te zijn. Dit terwijl uit figuur 5.2 juist blijkt dat vier net de grens is tussen wel of geen invloed van de inleiding van de puntlasten. De lengte van de modellen in andere onderzoeken ligt dus net op de grens en het is twijfelachtig of daarmee de werkelijkheid goed benaderd wordt.

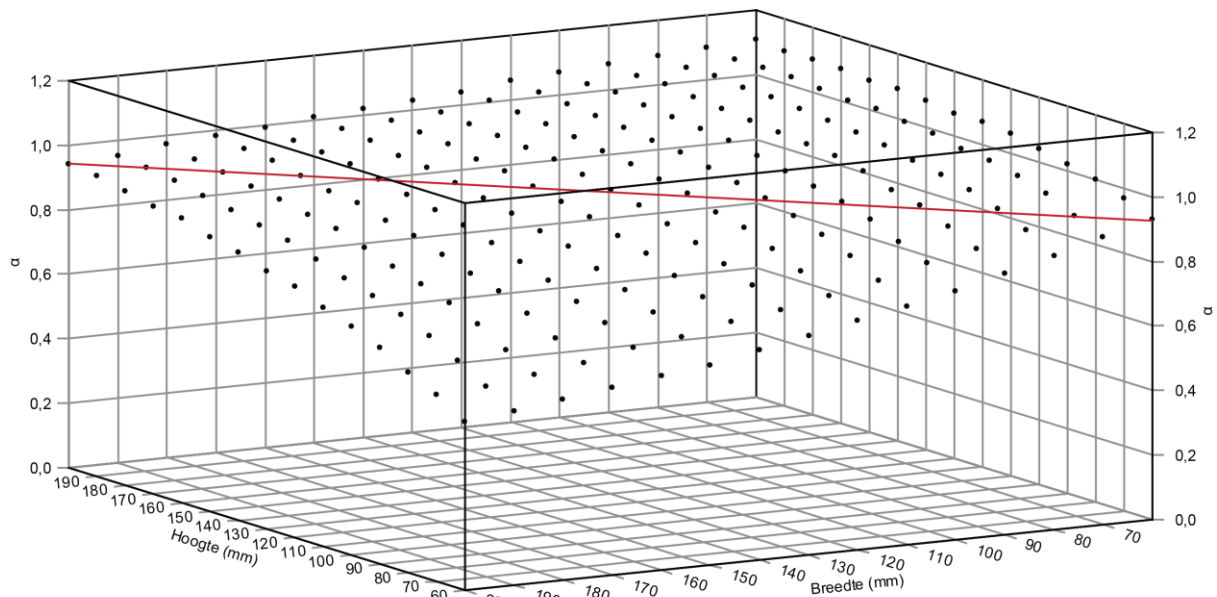
5.3 Tweede modellering

Uit het onderzoek van Van der Meer² is gebleken dat vierkante en hoge rechthoekige doorsneden een afschuifstijfheid van 1.2GA hebben. Dit is erg opvallend, omdat de resulterende stijfheid groter is dan het product van de glijdingsmodulus en het oppervlak. Het lijkt dus alsof er stijfheid van een groter oppervlak dan het oppervlak van de doorsnede aanwezig is. Hier is geen fysische verklaring voor.

Met behulp van de scripts uit bijlage F is de afschuifstijfheid voor liggers met alle hoogte en breedte combinaties tussen 50 en 200 uitgerekend. Er wordt dus verwacht dat de factor voor de afschuifstijfheid (α) groter dan 1 is. Door meerdere combinaties van de hoogte en breedte te modelleren wordt getracht inzicht in deze factor te krijgen om deze uiteindelijk ook fysisch te kunnen verklaren.

5.3.1 Resultaten

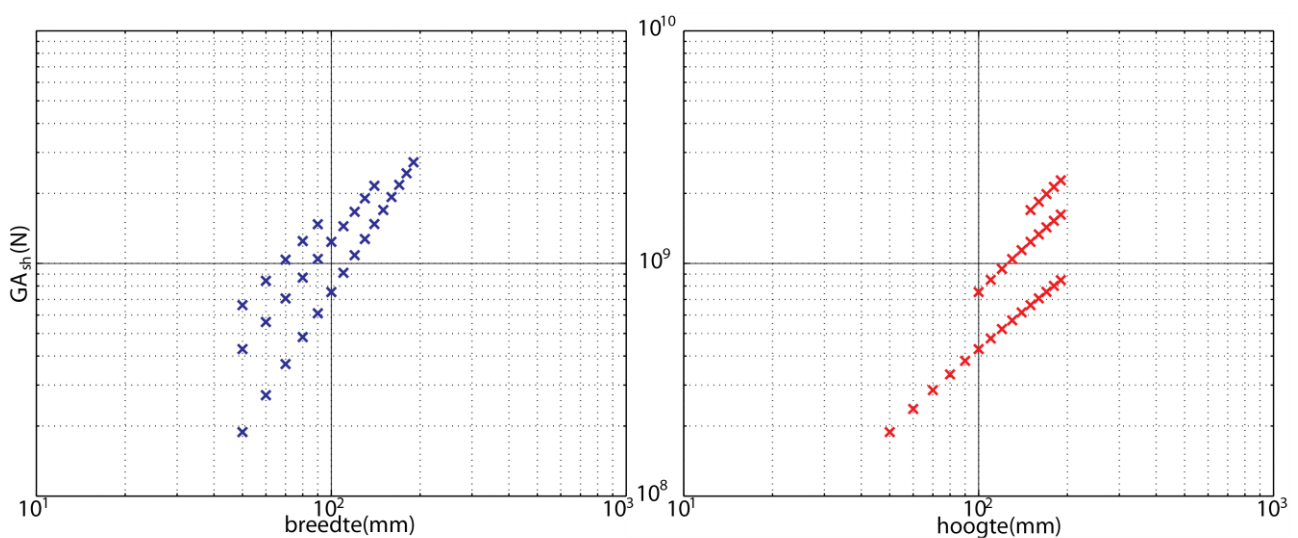
De resultaten van de tweede modellering zijn weergegeven in figuur 5.5 (zie ook Bijlage G en H). De rode lijn in de grafiek snijdt de waarden voor vierkante doorsneden. Een voorlopige conclusie uit deze grafiek is dat de factor α voor vierkante doorsneden (de punten op de rode lijn) in ieder geval kleiner dan één is.



Figuur 5.5 Factor α voor een ligger met lengte 1000mm

5.3.2 Conclusie hoge en vierkante liggers

Met behulp van het programma DataFit⁹ is een nauwkeurige en ingewikkelde benadering voor de afschuifstijfheid van vierkante en hoge doorsneden. Deze formule (zie bijlage I) is in figuur 5.6 in het blauw geplot voor een drietal hoogtes en in het rood geplot voor een drietal breedtes. Omdat de breedte altijd kleiner of gelijk aan de hoogte is zijn niet voor alle breedtes/hoogtes evenveel punten in de grafiek.



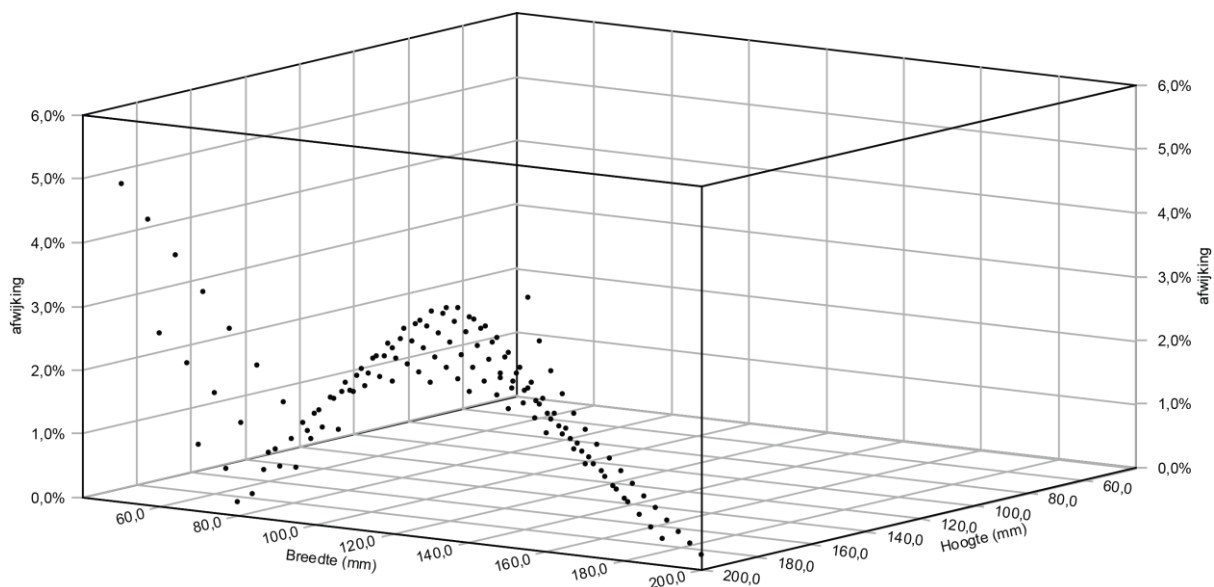
Figuur 5.6 Afschuifstijfheid tegen de hoogte en breedte op dubbellogaritmische schaal

Uit deze grafiek blijkt dat er op een dubbellogaritmische schaal een nagenoeg lineair verband is tussen de hoogte en de afschuifstijfheid en de breedte en de afschuifstijfheid. Concreet betekent dit dat de formule voor de afschuifstijfheid van liggers met $\frac{h}{b} \geq 1$ van de vorm $GA_{sh} = c_1 h^{c_2} b^{c_3}$ (met c_1 t/m c_3 als constanten) is. Voor de afschuifstijfheden waarbij $\frac{h}{b} \geq 1$ (zie bijlage G) zijn deze drie constanten berekend. Hiermee is de definitieve nieuwe benaderingsformule voor de afschuifstijfheid:

Formule 5.1

$$GA_{sh} = 0.943GA \left(\frac{h}{b}\right)^{0.154}$$

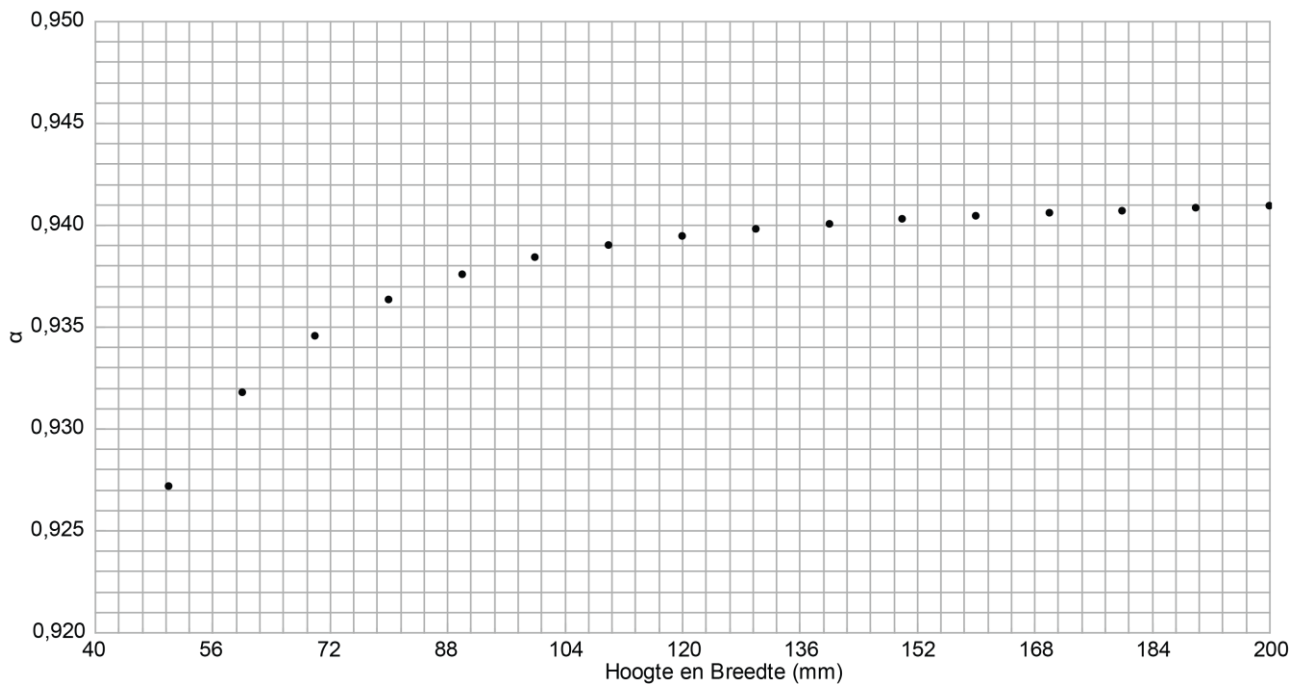
De afwijking van de gemodelleerde liggers ten opzichte van de waardes die verkregen worden met deze benaderingsformule is weergegeven in bijlage G. De maximale afwijking van deze formule is **5.0%**. De afwijking lijkt afhankelijk te zijn van de plaatwerking in de doorsnede (zie figuur 5.7). Bij de hoge $\frac{h}{b}$ -verhoudingen overheerst deze maximale afwijking.



Figuur 5.7 Afwijking van nieuwe benaderingsformule

5.3.3 Conclusie platte liggers

Voor liggers met een $\frac{h}{b} < 1$ lijkt de factor α naar nul te gaan. Hierbij geldt dat, wanneer de ligger veel breder is dan de hoogte, de ligger dan als een plaat gaat functioneren. De verplaatsing in de randen van de ligger zijn dan veel groter dan de verplaatsing in het midden. Deze plaatwerking is niet eenvoudig in een formule uit te drukken, mede doordat de verplaatsing over de breedte varieert. Voor $\frac{h}{b} = 1$ is de factor α geplot in figuur 5.8. Deze factor ligt met zekerheid onder de 0.943 voor platte liggers.



Figuur 5.8 Factor α voor een vierkante ligger

Conclusies

De zes eerdere eindwerken vertonen onderling nogal grote verschillen. Ook blijken de aanpakken en de resultaten fouten te bevatten. De belangrijkste zijn veroorzaakt doordat er te weinig modellen zijn gebruikt voor het opstellen van nieuwe formules en door onvoldoende nauwkeurigheid van het gebruikte elementtype.

Met name bij de twee soorten kokerprofielen, namelijk met ronde en met rechte hoeken, blijkt de nieuwe formule van de maximale schuifspanning niet extrapoleerbaar voor het tussengebied van deze formules.

Verder is vastgesteld dat de afschuifstijfheid constant is over het middelste deel van rechthoekige massieve liggers en niet beïnvloed wordt door het moment. De inleiding van de lasten bij de uiteinden zorgt lokaal voor sterke afwijkingen in de afschuifstijfheid. Dat betekent dat voor gedrongen liggers de afschuifstijfheid sterk afhangt van de lastinleiding aan de uiteinden.

Voor rechthoekige massieve liggers is een nieuwe formule voor de afschuifstijfheid afgeleid:

$$GA_{sh} = 0.943GA\left(\frac{h}{b}\right)^{0.154} \quad \text{voor } 4 \geq \frac{h}{b} \geq 1 \quad \text{max. afwijking is 5.0\%}$$

$$GA_{sh} < 0.943GA \quad \text{voor } \frac{1}{4} \leq \frac{h}{b} < 1$$

Een overzicht van de oude en nieuwe formules van de afschuifstijfheid en de maximale schuifspanning staat in bijlage J en K.

Aanbevelingen

Hoewel er al veel onderzoek gedaan is naar een grote verscheidenheid aan profielen zijn er zeker nog punten waar deze onderzoeken tekort schieten. Zo zou er meer onderzoek gedaan moeten worden naar de maximale schuifspanning in kokers met ronde en rechte hoeken. De grenzen voor de huidige formules zijn niet uitbreidbaar naar het tussenliggende gebied.

Voor de rechthoekige massieve profielen is er geen fysische verklaring gevonden waarom de factor α voor de afschuifstijfheid groter dan één is. In dit onderzoek is gebleken dat de hypothese van een over de lengte veranderende afschuifstijfheid niet klopt. Naar andere mogelijkheden moet dus nog gekeken worden.

Omdat er geen theoretische verklaring hiervoor te vinden is moet er naar een praktische verklaring worden gezocht. Het uitvoeren van een experiment in het laboratorium zou meer inzicht hierin kunnen geven. Door het uitvoeren van een model in de werkelijkheid kan geverifieerd worden of het inderdaad fysisch mogelijk is een afschuifstijfheid groter dan één te meten. Omdat alle eerdere eindwerken met ANSYS gemaakt zijn is een controle op ANSYS vereist voordat een totaaloverzicht gepubliceerd kan worden.

Daarnaast is het opvallend dat voor de modellen in ANSYS waarbij de afschuifstijfheid van belang is, namelijk de korte (gedrongen) liggers, er grote afwijkingen optreden. Er zou onderzocht moeten worden in hoeverre dit effect van toepassing is op de eerdere onderzoeken. Ook voor dit effect zijn

experimenten in het laboratorium cruciaal. Alleen dan kan worden vastgesteld hoe goed de benadering van de modellen in ANSYS zijn.

Het overzicht in bijlage K heeft verder nog de volgende tekortkomingen:

- De maximale schuifspanning voor rechthoekige massieve doorsneden en de afschuifstijfheid van I-profielen hebben een te grote afwijking.
- Van buisprofielen is de maximale afwijking niet bekend

Een eindwerk waarin deze afwijkingen zowel met ANSYS als in het laboratorium worden onderzocht zou een goede volgende stap zijn. Dit spreekt waarschijnlijk ook meer studenten aan.

Evaluatie

In het begin van het project heb ik veel tijd besteed aan het lezen van de eerder eindwerken en het kennismaken met ANSYS. Uit enkele eindwerken merkte ik op dat er gebruik werd gemaakt van Cygwin. Het heeft bij elkaar wel drie weken geduurd voordat ik dat programma en de samenwerking daarbij met ANSYS onder de knie had. Daarom heb ik ook besloten een stroomdiagram van het proces te maken en enkele betekenissen van functies in het verslag te zetten. Volgende studenten kunnen hierdoor hopelijk sneller aan de slag.

Bij het bestuderen van de verslagen en het werken aan mijn eigen verslag heb ik geleerd dat theoretische onderzoeken zoals deze nooit af zijn. Het is belangrijk om je doel niet uit het oog te verliezen en onnodige berekeningen te gaan maken.

Wat mij achteraf erg aansprak was hoe fundamenteel je soms met de stof bezig bent. Het zoeken naar verklaringen voor onbegrijpelijke factoren in formules was hier één van. Zelfstandigheid is hierbij erg belangrijk, dat sprak mij erg aan.

Dit onderzoek viel samen met het vak 'Numerieke methoden voor differentiaal vergelijkingen' en omdat het zoeken naar benaderingsformules voor modelresultaten bij beiden een belangrijke rol speelt kon ik deze nieuwe vakkennis meteen in de praktijk brengen.

Literatuur

Voor dit onderzoek is gebruik gemaakt van de volgende Bachelor Eindwerken. Deze eindwerken zijn allemaal gedaan aan de Technische Universiteit Delft op de faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen:

1. Hoogenboom, Dr. Ir. P.C.J. en Spaan, R. (2005). Shear Stiffness and Maximum Shear Stress of Tubular Members. Proceedings of The Fifteenth (2005) International Offshore and Polar Engineering Conference, Seoul, Korea.
2. Meer, J.M. van der (2003). Afschuifstijfheid van liggers en kolommen.
3. Spaan, R. (2003). Afschuifstijfheid en maximale schuifspanning van ronde doorsneden.
4. Velner, R. (2005). Afschuifstijfheid van kokers met ronde hoeken.
5. Voormeeren, L. (2008). Schuifspanning en afschuifstijfheid in stalen U-profielen
6. Weerd, B.M. van de. (2007). Schuifspanning en afschuifstijfheid in I-profielen
7. Wit, J.M. de. (2005). Afschuifstijfheid en maximale schuifspanning van rechthoekige kokerprofielen

Verder is er gebruik gemaakt van de volgende software

8. ANSYS 10.0 (2006)
9. DataFit 9.0 (2008)
10. Cygwin 1.7 (2012)

En van de volgende website:

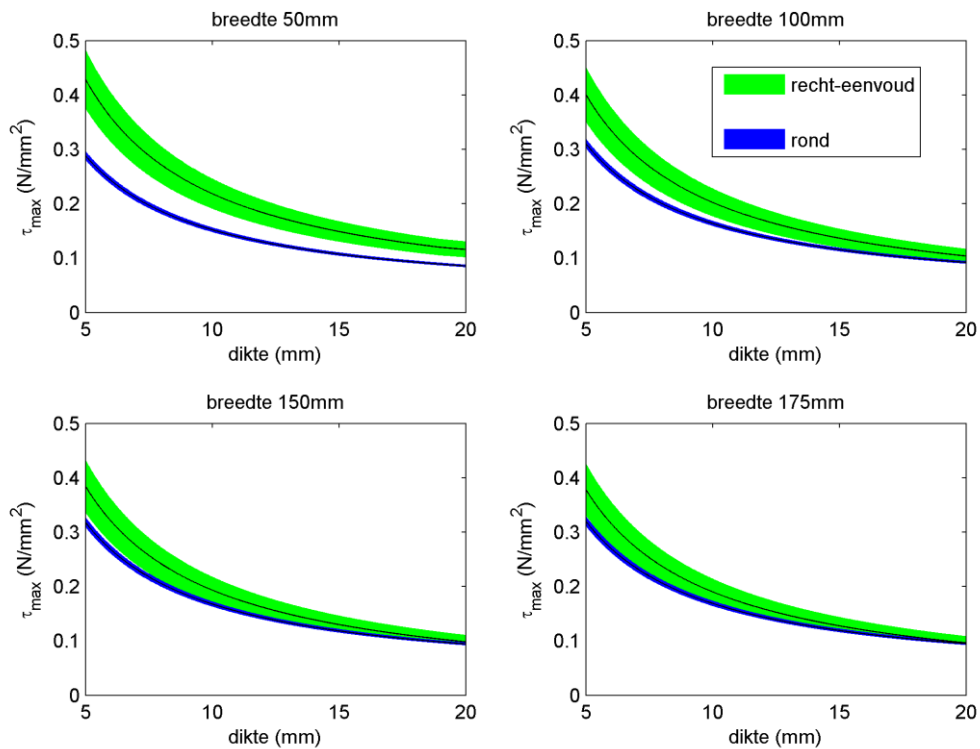
11. Bash commands Linux MAN Pages, <http://ss64.com/bash/>, geraadpleegd 6 juni 2012

Bijlage A: Overzicht eerdere Bachelor-eindwerken

Onderwerp	Afschuifstijfheid van liggers en kolommen			Ronde doorsneden			Rechthoekige kokerprofielen	Kokers met ronde hoeken	I-profielen	stalen U-profielen
Auteur	JM van der Meer			R Spaan			JM de Wit	R Velner	BM van de Weerd	L Voormeeren
Datum	juni 2003			november 2003			mei 2005	december 2005	december 2007	mei 2008
Overige conclusies	invloed buigvervorming is 0,5%									
versie ANSYS				6.1			7.1	8.0	10.0	
Profiel	Massief rechthoekig			Rond			Rechthoekige koker	Rechthoekige kokers met ronde hoeken	I-profiel	U-profiel (opening zijkant)
Totaal aantal modellen	10			15			14	199	392	12
Controle nieuwe formule	4			3			1	0	0	0
Elementtype	Solid45 en Solid186			Solid92			Solid45	Solid45 en Solid 95	Solid95	Solid95
Indeling	hoog	vierkant	Plat	dunwandig	dikwandig	massief	rechte hoek	ronde hoek	I-profiel	U-profiel
Voorwaarden indeling	h=3b	h=b	$h = \frac{b}{3}$	$0 < \frac{t}{r} \leq 0.2$	$0.2 < \frac{t}{r} < 1$	$\frac{t}{r} = 1$				
Afschuifstijfheid										
Aantal tests	4	1	1	4	7	1	13	199	392	12
Oude formule	$\frac{5}{6}GA$			$\frac{1}{2}GA$	geen	$\frac{32}{37}GA$	$2th * G$	geen	$G * t_w * (h - 2t_f)$	$G * t(h - 2t)$
Maximale afwijking	30%			75%		50%	30%		45%	53%
Nieuwe formule	GA	$\frac{6}{5}GA$		$\frac{1}{2}GA$	$(\frac{15}{16}\frac{t}{r} + \frac{5}{16})GA$	$\frac{5}{4}GA$	$2t(h + \frac{3}{4}t)GA$	$Gt(2.26h + 0.42r + 0.74t - 0.68b)$	$Gt_w(h + t_f)(\frac{23}{25} + \frac{1}{5}\frac{b}{h} + \frac{1}{18}\frac{r}{t_w})$	$Gt(h - 2t)(\frac{157}{200} - \frac{77}{11}\frac{h}{b} - \frac{689}{100}\frac{b}{h} + \frac{7}{20}\frac{b}{t} + \frac{1099}{50}\frac{t}{b} - \frac{683}{5000}\frac{r^2}{t})$
Voorwaarden formule							$0 < \frac{t}{b} \leq 1/2, \frac{1}{2} < \frac{h}{b} < \infty$	$\frac{b}{h} \leq 1.75, \frac{r}{t} < 4, 0.05 \leq \frac{t}{h} \leq 0.2$		
Maximale afwijking	4%	0,5%	0,5%	73%	23%	4,2%	1,8%	3%	8%	5%
Maximale spanning										
Soort spanning	Schuifspanning (τ)			Schuifspanning (τ)			Schuifspanning (τ)	Schuifspanning (τ)	Von Mises (τ en σ)	Von Mises (τ en σ)
Aantal tests	4	1	1	4	7	1	13	184	392	12
Oude formule	$\frac{3}{2}\frac{V}{A}$			$2\frac{V}{A}$	geen	$\frac{4}{3}\frac{V}{A}$	$\frac{15}{14} * \frac{V}{2th}$	geen	$\sqrt{3}\frac{V}{t_w * (h - 2t_f)}$	$\frac{V}{t(h - 2t)}$
Maximale afwijking	1,5%	12%	41%	10%		6%	60%		25%	13%
Nieuwe formule	nvt	nvt	$(0.2\frac{b}{h} + 1.5)\frac{V}{A}$	$(2 + \frac{t}{r})\frac{V}{A}$		$\frac{3}{2}\frac{V}{A}$	$(\frac{13}{8} - \frac{4b}{25h} + \frac{8b^2}{25h^2} + \cos\frac{2t\pi}{b}(-\frac{9}{200} - \frac{4b}{25h} + \frac{8b^2}{25h^2}))\frac{V}{A}$	$\frac{V}{t(1.88h - 1.44t - 0.43r)}(1 - 0.066\frac{h}{b} - 0.01\frac{t}{r})$	$\sqrt{3}\frac{V}{t_w * (h - 2t_f)}(\frac{25}{26} + \frac{1}{35}\frac{h}{b} + \frac{1}{10}\frac{t_w}{t_f})$	$\frac{V}{t(h - \frac{723}{250}t)}(\frac{1141}{1000} - \frac{179}{5000}\frac{h}{b} + \frac{39}{2500}\frac{r^2}{t})$
Voorwaarden formule			b>h					$\frac{b}{h} \leq 1.75, \frac{r}{t} < 4, 0.05 \leq \frac{t}{h} \leq 0.2$		
Maximale afwijking				30%	4,3%	5,7%	12,7%	2,89%	3%	0,8%
Meer onderzoek naar	Variatie in doorsneden			- Kleiner dan $\frac{t}{r} = 0.05$ - Tussen massief en $\frac{t}{r} = 0.9$ - Verbeterde mesh - Invloed moment			- Relatieve wanddikten $\frac{h}{b}$-verhouding - Invloed afrondingsstralen	- Niet-lineair effect - Nauwkeurigere invloeden van $\frac{r}{t}$ en $\frac{r}{h}$	- Hogere resolutie mesh - Spanningspieken in het lijf - Mogelijke materiaalwinst	- Nauwkeurigheid Timoshenko - Laboratoriumproeven - Meer profielen
Opmerkingen	Aantal tests op basis van indeling klopt niet precies						Hetzelfde controlemodel is voor beide grootheden gebruikt			

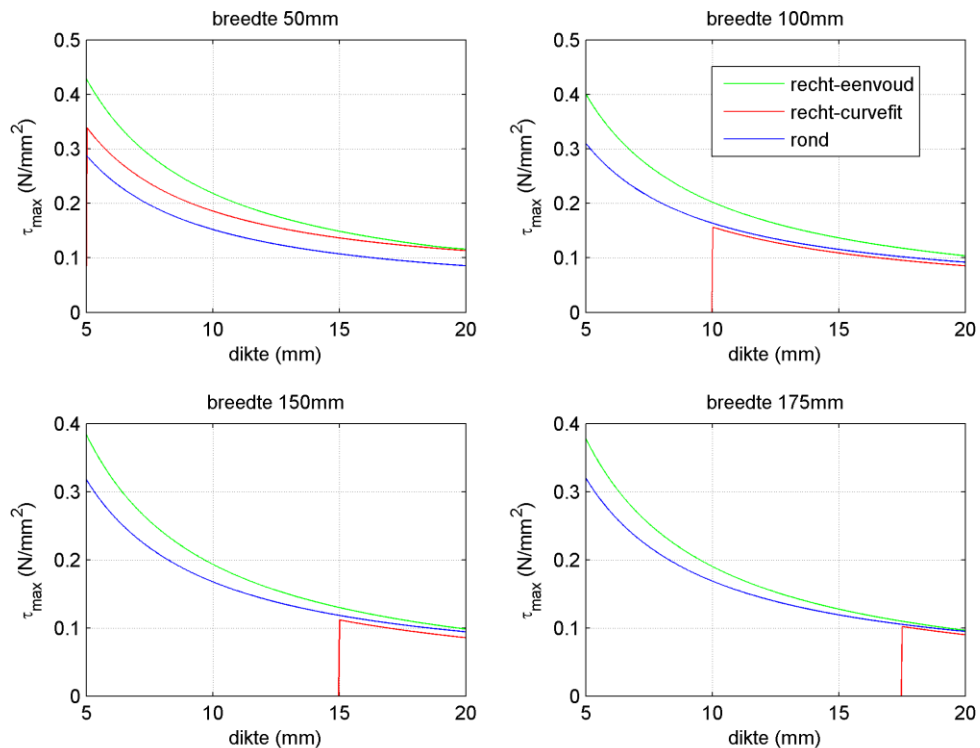
Bijlage B: Maximale schuifspanning van kokers

kokers met hoogte 100mm



Figuur B.1 Formules uit eindrapport met daaromheen de maximale afwijking

kokers met hoogte 100mm



Figuur B.2 Formules uit eindrapport voor verschillende breedtes

Bijlage C: Script eerste model

Ansys script onder de naam rechthoek.mac

```
! ANSYS-script

E = 2.1e5      ! Young's modulus      N/mm2
nu = 0.3       ! Poisson's ratio      -
l = 1000      ! length beam           mm
b = 70        ! width beam            mm
h = 200       ! height beam           mm
fh = 675      ! horizontal force      N
fv = 2*fh*h/l ! shearforce             N
md = 10       ! width mid slice       mm
lod = 13      ! level of detail      -

/PREP7
MPTEMP,,,,,,,, ! material: isotropic
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,E
MPDATA,PRXY,1,,nu
ET,1,SOLID95 ! element type

!Modeling
BLC4,0,0,b,h,(l-md)/2

!Extrusion
FLST,3,1,6,ORDE,1
FITEM,3,1
VGEN,2,P51X,,,(l-md)/2,,0
FLST,3,1,6,ORDE,1
FITEM,3,1
VGEN,2,P51X,,,(l+md)/2,,0
VSBV,2,3
FLST,3,1,6,ORDE,1
FITEM,3,1
VGEN,2,P51X,,,(l+md)/2,,0
FLST,2,3,6,ORDE,3
FITEM,2,1
FITEM,2,2
FITEM,2,4
VADD,P51X

!Supports
FLST,2,1,3,ORDE,1
FITEM,2,5
DK,P51X,, , ,0,UX,UY,UZ, , , ,
FLST,2,1,3,ORDE,1
FITEM,2,6
DK,P51X,, , ,0,UY,UZ, , , ,
FLST,2,1,3,ORDE,1
FITEM,2,14
DK,P51X,, , ,0,UY, , , , ,

!Loads
FLST,2,4,3,ORDE,4
FITEM,2,1
FITEM,2,3
FITEM,2,23
FITEM,2,24
FK,P51X,FZ,fh/2
FLST,2,4,3,ORDE,4
FITEM,2,2
FITEM,2,4
FITEM,2,21
FITEM,2,22
FK,P51X,FZ,-fh/2
FLST,2,4,3,ORDE,2
FITEM,2,21
FITEM,2,-24
FK,P51X,FY,fv/4
FLST,2,4,3,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-4
FK,P51X,FY,-fv/4
```

```
!Meshing
ESIZE,1/35,0,
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,9
AESIZE,P51X,50-2*lod,
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,3
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
VSWEEP,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
FINISH

!Solve
/SOLU
SOLVE
FINISH

!Post-process
/POST1
SET,FIRST
/ESHAPE,1,1
/EFACET,2

!Settings for images
/SHOW,PNG
PNGR,COMP,ON,9
/PLOPTS,INFO,1
/PLOPTS,LEG1,0
/PLOPTS,LEG2,0
/PLOPTS,FRAME,0
/PLOPTS,MINM,0
/PLOPTS,DATE,0
/TRIAD,OFF

!Displacement of slice
node1=NODE(b,h,(l-md)/2)
*GET,uz_top_right,NODE,node1,U,Z
node2=NODE(b,h,(l+md)/2)
*GET,uz_top_left,NODE,node2,U,Z
node3=NODE(b,0,(l+md)/2)
*GET,uz_bottom_left,NODE,node3,U,Z

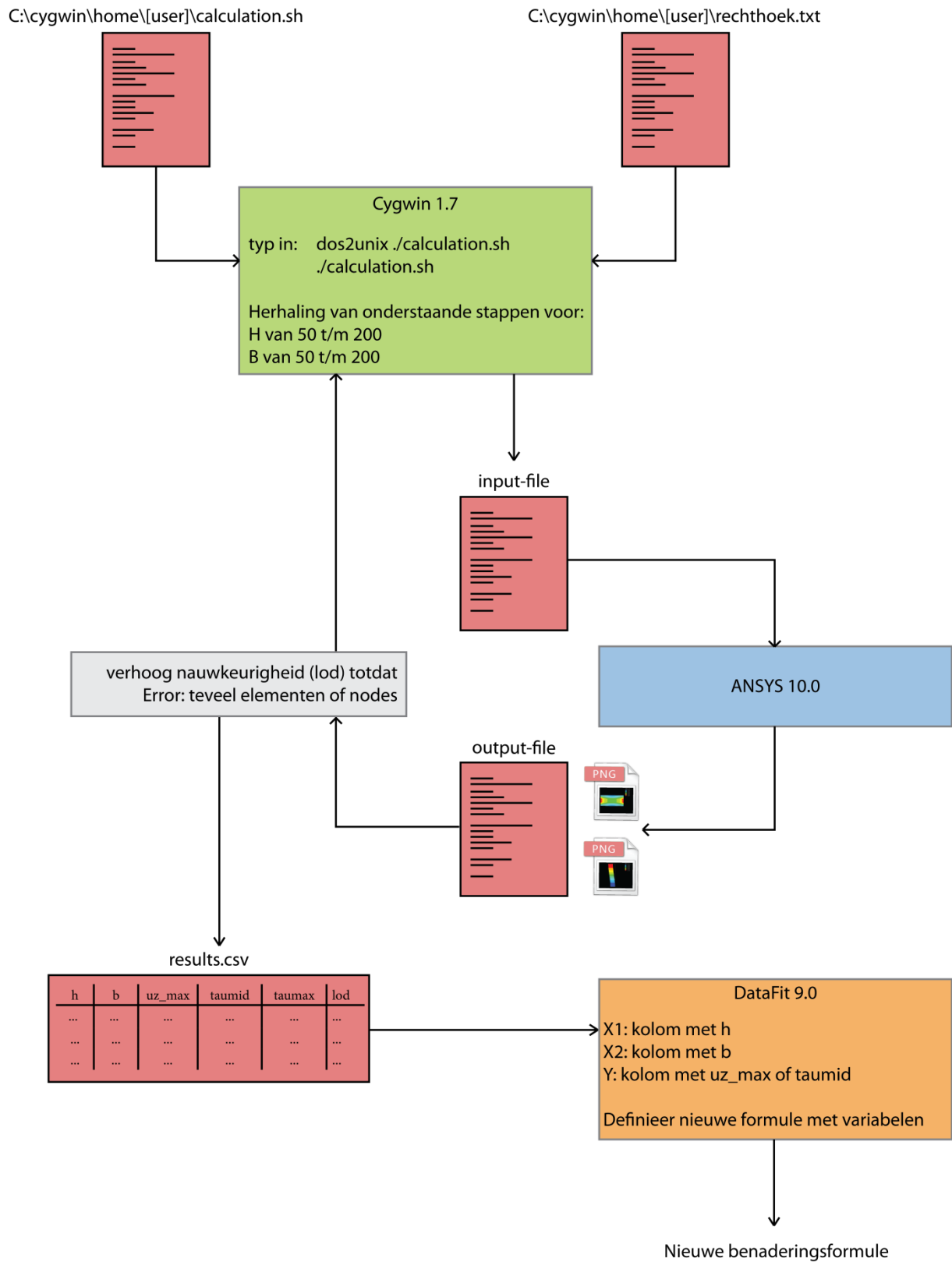
!Create Slices
ETABLE,slice,CENT,Z
ESEL,S,ETAB,slice,(l-md)/2,(l+md)/2,,
/VIEW,1,1,0,0
PLNSOL,U,Z,2,,
*GET,uz_max,PLNSOL,0,MAX,,

/VIEW,1,0,0,1
PLNSOL,S,EQV,0,,
*GET,taumax,PLNSOL,0,MAX,,

ETABLE,mid,CENT,Y
ESEL,R,ETAB,mid,.4*h,.6*h,,

/VIEW,1,1,0,0
PLNSOL,S,EQV,0,,
*GET,taumid,PLNSOL,0,MAX,,
```

Bijlage D: Stroomdiagram automatisering



D.1 Methodiek

Met behulp van Cygwin en het script uit bijlage F.1 is een groot aantal profielen volgens het ANSYS-script uit bijlage F.2 gemodelleerd. De resultaten daarvan zijn in het bestand **results.csv** opgeslagen. Vanuit Windows is het noodzakelijk dat met behulp van het **dos2unix**-command het bash-script van een DOS-formaat wordt omgezet naar een UNIX-formaat. Vervolgens kan dit bash-script worden uitgevoerd met behulp van het programma Cygwin.

Cygwin rekent vervolgens allerlei combinaties van profielafmetingen door via het ANSYS-script **rechthoek.txt**. De maximale verplaatsing, maximale schuifspanning en schuifspanning in het midden van de doorsnede worden per profiel in **results.csv** opgeslagen waarna ze verder bewerkt kunnen worden.

In bijlage F zijn de hoogte en breedte gevarieerd en is de nauwkeurigheid (lod) geoptimaliseerd. Hetzelfde principe kan worden uitgebreid met de lengte, het moment en de breedte van de middenplak. In tabel D.1 een overzicht van enkele gebruikte commando's die nuttig zijn bij het aanpassen van het script.

Tabel D.1¹¹

!	Niet
&&	En
	Of (bitsgewijs)
	Of
break	Verlaat de huidige lus
cat	Samenvoegen en afdrukken van de inhoud van een bestand
cut	Verdeel een bestand in stukken
-d"="	Scheidingsteken tussen velden is = (alleen bij cut)
-e	Bestaat (exists)
echo	Weergeven van bericht op het scherm
-eq	Gelijk aan (equal to)
-f3	Veldnummer op de regel is 3 (alleen bij cut)
grep	Zoek in bestanden naar een bepaald patroon
if [a] ; then b elif [c] ; then d else e fi	Voer b uit wanneer a geldt, voer c uit wanneer d geldt en voer anders e uit
-le	Kleiner dan of gelijk aan (less than or equal to)
let	Voer berekeningen uit met variabelen
-lt	Kleiner dan (less than)
read	Lees een regel uit de invoer
rm	Verwijder bestanden
while [a] ; do b done	Voer b uit zolang a geldt

Bijlage E: Script en resultaten inleiding van de lasten

calculation.sh

```
#!/bin/bash
set ANSYS_LOCK=OFF
set ANS_CONSEC=YES

data="shear_resistance" # name for data-file
u="" # to solve the problem of underscores with variables
z="0" # to solve the problem of zeros with variables
echo "H;B;V;uz_tl;uz_tr;uz_bl;uz_max;dz" >> $data.csv #create headlines for shear_resistance.csv

H=100
B=70
lod=13 # level of detail
plod=0 # minimum level of detail

dz=10 # location of slice
ddz=10 # step-size of dz
while [ $dz -le 680 ] ; do

    jobname=$H$B$V$lod$uz$dz
    echo "$jobname is now being calculated."

    # compile ANSYS input file
    echo "/batch " > $jobname.inp
    echo "!ANSYS 10.0 Input File" >> $jobname.inp
    echo "/FILENAME,$jobname,0 " >> $jobname.inp
    echo "*SET,h,$H" >> $jobname.inp
    echo "*SET,b,$B" >> $jobname.inp
    echo "*SET,lod,$lod" >> $jobname.inp
    echo "*SET,dz,$dz" >> $jobname.inp
    cat rechthoek.txt >> $jobname.inp #name of ANSYS script

    # start ANSYS
    /cygdrive/c/Program\ Files/Ansys\ Inc/v100/ANSYS/bin/intel/ansys.exe -p ansysuh -b -i $jobname.inp -o $jobname.out

    let llod=lod-1 # previous level of detail
    ljobname=$H$B$V$llod$uz$dz # previous jobname

    if [ ! -e $jobname.rst ] ; then
        if [ $plod -ne $lod ] ; then
            echo "$jobname could not be calculated."
            rm -I $jobname.inp
            rm -I $jobname.out

            # read relevant values from ANSYS output file
            read fv < <(grep FV $ljobname.out | cut -d"=" -f2)
            read uz_tr < <(grep UZ_TOP_RIGHT $ljobname.out | cut -d"=" -f3)
            read uz_tl < <(grep UZ_TOP_LEFT $ljobname.out | cut -d"=" -f3)
            read uz_bl < <(grep UZ_BOTTOM_LEFT $ljobname.out | cut -d"=" -f3)
            read uz_max < <(grep UZ_MAX $ljobname.out | cut -d"=" -f3)

            echo "$H;$B;$fv;$uz_tr;$uz_tl;$uz_bl;$uz_max;$llod;$dz" >> $data.csv
            echo "calculation of $ljobname has been completed."
            let lod=lod-1
            echo "lod will remain $lod."
            let dz=dz+ddz
            echo "width of mid-slice is adjusted to $dz."
        else
            break
        fi
    elif [ -e $jobname.rst ] ; then
        if [ $plod -ne $lod ] ; then
            # remove redundant files
            if [ -e $ljobname.inp ] ; then
                rm -I $ljobname.inp
                rm -I $ljobname.out
                n=0
                while [ $n -le 5 ] ; do
                    if [ -e $ljobname$z$z$n.png ] ; then
                        rm $ljobname$z$z$n.png
                    fi
                    let n=n+1
                done
            fi

            let plod=lod
            let lod=lod+1

            echo "level of detail is adjusted to $lod."
        else
            # read relevant values from ANSYS output file
            read fv < <(grep FV $jobname.out | cut -d"=" -f2)
            read uz_tr < <(grep UZ_TOP_RIGHT $jobname.out | cut -d"=" -f3)
            read uz_tl < <(grep UZ_TOP_LEFT $jobname.out | cut -d"=" -f3)
            read uz_bl < <(grep UZ_BOTTOM_LEFT $jobname.out | cut -d"=" -f3)
            read uz_max < <(grep UZ_MAX $jobname.out | cut -d"=" -f3)

            echo "$H;$B;$fv;$uz_tr;$uz_tl;$uz_bl;$uz_max;$lod;$dz" >> $data.csv
            echo "calculation of $jobname has been completed."
            let dz=dz+ddz
            echo "width of mid-slice is adjusted to $dz."
        fi
        rm -I $jobname.rst
        rm -I $jobname.stat
    fi
done
exit 0
```

rechthoek.txt

!ANSYS-script

```

E = 2.1e5      ! Young's modulus      N/mm2
nu = 0.3       ! Poisson's ratio      -
l = 700        ! length                mm
fh = 675       ! horizontal force     N
fv = 2*fh*h/l  ! shearforce            N
md = 10        ! width mid slice      mm

```

/PREP7

```

MPTEMP,,,,,,,, ! material: isotropic
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,E
MPDATA,PRXY,1,,nu
ET,1,SOLID95   ! element type

```

!Modeling

```

BLC4,0,0,b,h,dz
BLC4,0,0,b,h,md
BLC4,0,0,b,h,l-md-dz

```

!Extrusion

```

FLST,3,1,6,ORDE,1
FITEM,3,2
VGEN,1,P51X, , , , dz, ,0,1
FLST,3,1,6,ORDE,1
FITEM,3,3
VGEN,1,P51X, , , , dz+md, ,0,1
FLST,2,3,6,ORDE,3
FITEM,2,1
FITEM,2,2
FITEM,2,3
VADD,P51X

```

!Supports

```

FLST,2,1,3,ORDE,1
FITEM,2,5
DK,P51X, , , ,0,UX,UY,UZ, , , ,
FLST,2,1,3,ORDE,1
FITEM,2,6
DK,P51X, , , ,0,UY,UZ, , , ,
FLST,2,1,3,ORDE,1
FITEM,2,13
DK,P51X, , , ,0,UY, , , , ,

```

!Loads

```

FLST,2,4,3,ORDE,4
FITEM,2,1
FITEM,2,3
FITEM,2,23
FITEM,2,24
FK,P51X,FZ,fh/2
FLST,2,4,3,ORDE,4
FITEM,2,2
FITEM,2,4
FITEM,2,21
FITEM,2,22
FK,P51X,FZ,-fh/2
FLST,2,4,3,ORDE,2
FITEM,2,21
FITEM,2,-24
FK,P51X,FY,fv/4
FLST,2,4,3,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-4
FK,P51X,FY,-fv/4

```

!Meshing

```

ESIZE,1/30,0,
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,9
AESIZE,P51X,50-2*lod,
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,4
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
VSWEEP,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
FINISH

```

!Solve

```

/SOLU
SOLVE
FINISH

```

```

/DELETE,,pvts
/DELETE,,bcs
/DELETE,,mntr
/DELETE,,esav
/DELETE,,full
FINISH

```

!Post-process

```

/POST1
/GRAPHICS,POWER
SET,FIRST
/ESHAPE,1,1
/EFACET,2

```

!Settings for images

```

/SHOW,PNG
PNGR,COMP,ON,9
/PLOPTS,INFO,1
/PLOPTS,LEG1,0
/PLOPTS,LEG2,0
/PLOPTS,FRAME,0
/PLOPTS,MINM,0
/PLOPTS,DATE,0
/TRIAD,OFF

```

!Displacement of slice

```

node1=NODE(b,h,dz)
*GET,uz_top_right,NODE,node1,U,Z
node2=NODE(b,h,dz+md)
*GET,uz_top_left,NODE,node2,U,Z
node3=NODE(b,0,dz+md)
*GET,uz_bottom_left,NODE,node3,U,Z

```

!slices

```

ETABLE,slice,CENT,Z
ESEL,S,ETAB,slice,dz,dz+md,,
/VIEW,1,1,0,0
PLNSOL,U,Z,2,,
*GET,uz_max,PLNSOL,0,MAX,,

```

```

/eof

```

Gebruikte formules:

$$GA_{sh} = \frac{HF_v}{\frac{u_{zbr} + u_{zbl}}{2} - \frac{1}{2}u_{zol}}$$

$$\alpha = \frac{GA_{sh}}{\frac{2.1 * 10^5}{2(1 + 0.3))} HB}$$

$$locatie = \frac{dz + 5}{H}$$

H	B	Fv	Uzbr	Uzbl	Uzol	Uz_max	lod	dz	GAsh	α	locatie
100	70	192,857	3,98E-04	6,50E-04	2,52E-04	6,50E-04	19	10	4,85E+07	0,09	0,15
100	70	192,857	-1,71E-04	-1,76E-04	-4,96E-06	4,98E-05	19	20	-1,13E+08	-0,20	0,25
100	70	192,857	-3,31E-04	-3,78E-04	-4,70E-05	0,00E+00	19	30	-5,83E+07	-0,10	0,35
100	70	192,857	1,08E-04	1,50E-04	4,26E-05	1,50E-04	19	40	1,79E+08	0,32	0,45
100	70	192,857	1,00E-04	1,41E-04	4,04E-05	1,41E-04	19	50	1,92E+08	0,34	0,55
100	70	192,857	2,14E-05	4,40E-05	2,27E-05	4,52E-05	19	60	9,02E+08	1,59	0,65
100	70	192,857	1,78E-05	3,82E-05	2,03E-05	4,01E-05	19	70	1,08E+09	1,91	0,75
100	70	192,857	3,51E-05	5,58E-05	2,08E-05	5,58E-05	19	80	5,50E+08	0,97	0,85
100	70	192,857	3,60E-05	5,61E-05	2,01E-05	5,61E-05	19	90	5,36E+08	0,95	0,95
100	70	192,857	3,26E-05	5,19E-05	1,92E-05	5,19E-05	19	100	5,91E+08	1,05	1,05
100	70	192,857	3,27E-05	5,12E-05	1,85E-05	5,12E-05	19	110	5,89E+08	1,04	1,15
100	70	192,857	3,27E-05	5,04E-05	1,77E-05	5,04E-05	19	120	5,89E+08	1,04	1,25
100	70	192,857	3,37E-05	5,06E-05	1,69E-05	5,06E-05	19	130	5,73E+08	1,01	1,35
100	70	192,857	3,37E-05	4,98E-05	1,61E-05	4,98E-05	19	140	5,72E+08	1,01	1,45
100	70	192,857	3,35E-05	4,89E-05	1,53E-05	4,89E-05	19	150	5,75E+08	1,02	1,55
100	70	192,857	3,35E-05	4,81E-05	1,46E-05	4,81E-05	19	160	5,76E+08	1,02	1,65
100	70	192,857	3,35E-05	4,73E-05	1,38E-05	4,73E-05	19	170	5,75E+08	1,02	1,75
100	70	192,857	3,35E-05	4,65E-05	1,30E-05	4,65E-05	19	180	5,75E+08	1,02	1,85
100	70	192,857	3,35E-05	4,57E-05	1,22E-05	4,57E-05	19	190	5,75E+08	1,02	1,95
100	70	192,857	3,35E-05	4,50E-05	1,14E-05	4,50E-05	19	200	5,75E+08	1,02	2,05
100	70	192,857	3,35E-05	4,42E-05	1,06E-05	4,42E-05	19	210	5,75E+08	1,02	2,15
100	70	192,857	3,35E-05	4,34E-05	9,84E-06	4,34E-05	19	220	5,75E+08	1,02	2,25
100	70	192,857	3,35E-05	4,26E-05	9,05E-06	4,26E-05	19	230	5,75E+08	1,02	2,35
100	70	192,857	3,35E-05	4,18E-05	8,27E-06	4,18E-05	19	240	5,75E+08	1,02	2,45
100	70	192,857	3,35E-05	4,10E-05	7,48E-06	4,10E-05	19	250	5,75E+08	1,02	2,55
100	70	192,857	3,35E-05	4,02E-05	6,69E-06	4,02E-05	19	260	5,75E+08	1,02	2,65
100	70	192,857	3,35E-05	3,94E-05	5,90E-06	3,94E-05	19	270	5,75E+08	1,02	2,75
100	70	192,857	3,35E-05	3,87E-05	5,12E-06	3,87E-05	19	280	5,75E+08	1,02	2,85
100	70	192,857	3,35E-05	3,79E-05	4,33E-06	3,79E-05	19	290	5,75E+08	1,02	2,95

H	B	Fv	Uzbr	Uzbl	Uzol	Uz_max	lod	dz	GAsh	α	locatie
100	70	192,857	3,35E-05	3,71E-05	3,54E-06	3,71E-05	19	300	5,75E+08	1,02	3,05
100	70	192,857	3,35E-05	3,63E-05	2,76E-06	3,63E-05	19	310	5,75E+08	1,02	3,15
100	70	192,857	3,35E-05	3,55E-05	1,97E-06	3,55E-05	19	320	5,75E+08	1,02	3,25
100	70	192,857	3,35E-05	3,47E-05	1,18E-06	3,47E-05	19	330	5,75E+08	1,02	3,35
100	70	192,857	3,35E-05	3,39E-05	3,93E-07	3,39E-05	19	340	5,75E+08	1,02	3,45
100	70	192,857	3,35E-05	3,31E-05	-3,94E-07	3,35E-05	19	350	5,75E+08	1,02	3,55
100	70	192,857	3,35E-05	3,24E-05	-1,18E-06	3,35E-05	19	360	5,75E+08	1,02	3,65
100	70	192,857	3,35E-05	3,16E-05	-1,97E-06	3,35E-05	19	370	5,75E+08	1,02	3,75
100	70	192,857	3,35E-05	3,08E-05	-2,76E-06	3,35E-05	19	380	5,75E+08	1,02	3,85
100	70	192,857	3,35E-05	3,00E-05	-3,54E-06	3,35E-05	19	390	5,75E+08	1,02	3,95
100	70	192,857	3,35E-05	2,92E-05	-4,33E-06	3,35E-05	19	400	5,75E+08	1,02	4,05
100	70	192,857	3,35E-05	2,84E-05	-5,12E-06	3,35E-05	19	410	5,75E+08	1,02	4,15
100	70	192,857	3,35E-05	2,76E-05	-5,90E-06	3,35E-05	19	420	5,75E+08	1,02	4,25
100	70	192,86	3,35E-05	2,68E-05	-6,69E-06	3,35E-05	19	430	5,75E+08	1,02	4,35
100	70	192,86	3,35E-05	2,61E-05	-7,48E-06	3,35E-05	19	440	5,75E+08	1,02	4,45
100	70	192,86	3,35E-05	2,53E-05	-8,27E-06	3,35E-05	19	450	5,75E+08	1,02	4,55
100	70	192,86	3,35E-05	2,45E-05	-9,05E-06	3,35E-05	19	460	5,75E+08	1,02	4,65
100	70	192,86	3,35E-05	2,37E-05	-9,84E-06	3,35E-05	19	470	5,75E+08	1,02	4,75
100	70	192,86	3,35E-05	2,29E-05	-1,06E-05	3,35E-05	19	480	5,75E+08	1,02	4,85
100	70	192,86	3,35E-05	2,21E-05	-1,14E-05	3,35E-05	19	490	5,75E+08	1,02	4,95
100	70	192,86	3,35E-05	2,13E-05	-1,22E-05	3,35E-05	19	500	5,75E+08	1,02	5,05
100	70	192,86	3,35E-05	2,06E-05	-1,30E-05	3,35E-05	19	510	5,75E+08	1,02	5,15
100	70	192,86	3,35E-05	1,98E-05	-1,38E-05	3,35E-05	19	520	5,75E+08	1,02	5,25
100	70	192,86	3,35E-05	1,89E-05	-1,46E-05	3,35E-05	19	530	5,76E+08	1,02	5,35
100	70	192,86	3,35E-05	1,82E-05	-1,53E-05	3,35E-05	19	540	5,75E+08	1,02	5,45
100	70	192,86	3,37E-05	1,76E-05	-1,61E-05	3,37E-05	19	550	5,72E+08	1,01	5,55
100	70	192,86	3,37E-05	1,68E-05	-1,69E-05	3,37E-05	19	560	5,73E+08	1,01	5,65
100	70	192,86	3,27E-05	1,50E-05	-1,77E-05	3,27E-05	19	570	5,89E+08	1,04	5,75
100	70	192,86	3,27E-05	1,43E-05	-1,85E-05	3,27E-05	19	580	5,89E+08	1,04	5,85
100	70	192,86	3,26E-05	1,34E-05	-1,92E-05	3,26E-05	19	590	5,91E+08	1,05	5,95
100	70	192,86	3,60E-05	1,59E-05	-2,01E-05	3,60E-05	19	600	5,36E+08	0,95	6,05
100	70	192,86	3,51E-05	1,43E-05	-2,08E-05	3,51E-05	19	610	5,50E+08	0,97	6,15
100	70	192,86	1,78E-05	-2,48E-06	-2,03E-05	1,97E-05	19	620	1,08E+09	1,91	6,25
100	70	192,86	2,14E-05	-1,27E-06	-2,27E-05	2,25E-05	19	630	9,02E+08	1,59	6,35
100	70	192,86	1,00E-04	5,98E-05	-4,04E-05	1,00E-04	19	640	1,92E+08	0,34	6,45
100	70	192,86	1,08E-04	6,51E-05	-4,26E-05	1,08E-04	19	650	1,79E+08	0,32	6,55
100	70	192,86	-3,31E-04	-2,84E-04	4,70E-05	4,70E-05	19	660	-5,83E+07	-0,10	6,65
100	70	192,86	-1,71E-04	-1,66E-04	4,96E-06	5,47E-05	19	670	-1,13E+08	-0,20	6,75
100	70	192,86	3,98E-04	1,46E-04	-2,52E-04	3,98E-04	19	680	4,85E+07	0,09	6,85

Bijlage F: Scripts tweede modellering

F.1 Bash-script

calculation.sh

```
#!/bin/bash
set ANSYS_LOCK=OFF
set ANS_CONSEC=YES

data="results" # name for data-file
u="_" # to solve the problem of underscores with variables
z="0" # to solve the problem of zeros with variables

echo "H;B;uz_tr;uz_tl;uz_bl;uz_max;lod" >> $data.csv #create headlines for results.csv

H=50
while [ $H -le 200 ] ; do # height-loop

    B=50
    while [ $B -le 200 ] ; do # width-loop

        lod=1 # level of detail
        dlod = 1 # delta level of detail
        while [ $lod -le 100 ] ; do

            jobname=$H$u$B$u$lod
            echo "$jobname is now being calculated."

            # compile ANSYS input file
            echo "/batch " > $jobname.inp
            echo "!ANSYS 10.0 Input File" >> $jobname.inp
            echo "/FILENAME,$jobname,0 " >> $jobname.inp
            echo "*SET,h,$H" >> $jobname.inp
            echo "*SET,b,$B" >> $jobname.inp
            echo "*SET,lod,$lod" >> $jobname.inp
            cat rechthoek.txt >> $jobname.inp #name of ANSYS script

            # start ANSYS
            /cygdrive/c/Program Files/Ansys\ Inc/v100/ANSYS/bin/intel/ansys.exe -p ansysuh -b -i $jobname.inp -o
            $jobname.out

            let llod=lod-dlod # previous level of detail
            ljobname=$H$u$B$u$llod # previous jobname

            if [ ! -e $jobname.rst ] ; then
                echo "$jobname could not be calculated."
                rm -I $jobname.inp
                rm -I $jobname.out

                # read relevant values from ANSYS output file
                read uz_tr < <(grep UZ_TOP_RIGHT $ljobname.out | cut -d"=" -f3)
                read uz_tl < <(grep UZ_TOP_LEFT $ljobname.out | cut -d"=" -f3)
                read uz_bl < <(grep UZ_BOTTOM_LEFT $ljobname.out | cut -d"=" -f3)
                read uz_max < <(grep UZ_MAX $ljobname.out | cut -d"=" -f3)

                break
            else
                # remove redundant files
                if [ -e $ljobname.inp ] ; then
                    n=0
                    while [ $n -le 5 ] ; do
                        if [ -e $ljobname$z$z$n.png ] ; then
                            rm $ljobname$z$z$n.png
                        fi
                        let n=n+1
                    done
                    rm -I $ljobname.inp
                    rm -I $ljobname.out
                fi

                let lod=lod+dlod;
                echo "level of detail is adjusted to $lod."
            fi

            rm -I $jobname.rst
            rm -I $jobname.stat
        done

        # write parameters and results to results.csv
        echo "$H;$B;$uz_tr;$uz_tl;$uz_bl;$uz_max;$llod" >> $data.csv
        echo "calculation of $ljobname has been completed."

        let B=B+10 # increase of width by 10mm
    done

    let H=H+10 # increase of height by 10mm
done

exit 0
```

F.2 ANSYS-script

rechthoek.txt

!ANSYS-script

```
E = 2.1e5      ! Young's modulus   N/mm2
nu = 0.3       ! Poisson's ratio   -
l = 1000       ! length beam      mm
fh = 700       ! horizontal force  N
fv = 2*fh*h/l  ! shearforce       N
md = 10        ! width mid slice  mm
```

```
/PREP7
MPTEMP,,,,,,,, ! material: isotropic
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,E
MPDATA,PRXY,1,,nu
ET,1,SOLID95   ! element type
```

!Modeling

```
BLC4,0,0,0,b,h,(1-md)/2
```

!Extrusion

```
FLST,3,1,6,ORDE,1
FITEM,3,1
VGEN,2,P51X, , , , (1-md)/2, , 0
FLST,3,1,6,ORDE,1
FITEM,3,1
VGEN,2,P51X, , , , (1+md)/2, , 0
VSBV,2,3
FLST,3,1,6,ORDE,1
FITEM,3,1
VGEN,2,P51X, , , , (1+md)/2, , 0
FLST,2,3,6,ORDE,3
FITEM,2,1
FITEM,2,2
FITEM,2,4
VADD,P51X
```

!Supports

```
FLST,2,1,3,ORDE,1
FITEM,2,5
DK,P51X, , , , 0,UX,UY,UZ, , , ,
FLST,2,1,3,ORDE,1
FITEM,2,6
DK,P51X, , , , 0,UY,UZ, , , ,
FLST,2,1,3,ORDE,1
FITEM,2,14
DK,P51X, , , , 0,UY, , , , ,
```

!Loads

```
FLST,2,4,3,ORDE,4
FITEM,2,1
FITEM,2,3
FITEM,2,23
FITEM,2,24
FK,P51X,FZ,fh/2
FLST,2,4,3,ORDE,4
FITEM,2,2
FITEM,2,4
FITEM,2,21
FITEM,2,22
FK,P51X,FZ,-fh/2
FLST,2,4,3,ORDE,2
FITEM,2,21
FITEM,2,-24
FK,P51X,FY,fv/4
FLST,2,4,3,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-4
FK,P51X,FY,-fv/4
```

!Meshing

```
ESIZE,1/35,0,
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,9
AESIZE,P51X,50-2*1od,
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , , 3
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
VSWEEP,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
FINISH
```

!Solve

```
/SOLU
SOLVE
FINISH
```

```
/DELETE,,pvts
/DELETE,,bcs
/DELETE,,mntr
/DELETE,,esav
/DELETE,,full
FINISH
```

!Post-process

```
/POST1
/GRAPHICS,POWER
SET,FIRST
/ESHAPE,1,1
/EFACET,2
```

!Settings for images

```
/SHOW,PNG
PNGR,COMP,ON,9
/PLOPTS,INFO,1
/PLOPTS,LEG1,0
/PLOPTS,LEG2,0
/PLOPTS,FRAME,0
/PLOPTS,MINM,0
/PLOPTS,DATE,0
/TRIAD,OFF
```

!Displacement of slice

```
node1=NODE(b,h,(1-md)/2)
*GET,uz_top_right,NODE,node1,U,Z
node2=NODE(b,h,(1+md)/2)
*GET,uz_top_left,NODE,node2,U,Z
node3=NODE(b,0,(1+md)/2)
*GET,uz_bottom_left,NODE,node3,U,Z
```

!Create Slices

```
ETABLE,slice,CENT,Z
ESEL,S,ETAB,slice,(1-md)/2,(1+md)/2,,
/VIEW,1,1,0,0
PLNSOL,U,Z,2,,
*GET,uz_max,PLNSOL,0,MAX,,
```

```
/VIEW,1,0,0,1
PLNSOL,S,EQV,0,,
```

```
ETABLE,mid,CENT,Y
ESEL,R,ETAB,mid,.4*h,.6*h,,
/VIEW,1,1,0,0
PLNSOL,S,EQV,0,,
```

```
/EOF
```

Bijlage G: Resultaten tweede modellering

Gebruikte formules:

$$GA_{sh} = \frac{HF_v}{\frac{u_{zbr} + u_{zbl}}{2} - \frac{1}{2}u_{zol}}$$

$$GA = \frac{2.1 * 10^5}{2(1 + 0.3))} HB$$

$$\alpha = \frac{GA_{sh}}{GA}$$

$$GA_{nieuw} = \frac{2.1 * 10^5}{2(1 + 0.3))} 0.943 HB \left(\frac{H}{B}\right)^{0.154}$$

$$afwijking = \frac{|GA_{nieuw} - GA_{sh}|}{GA_{sh}} 100\%$$

H	B	Fv	uz_b_r	uz_b_l	uz_o_l	uz_max	lod	GAsh	GA	α	H/B	afwijking
50	50	70	1,87E-05	1,87E-05	-7,00E-13	1,87E-05	20	1,87E+08	2,02E+08	0,93	1,00	1,71%
50	60	70	1,65E-05	1,65E-05	2,22E-13	1,65E-05	19	2,12E+08	2,42E+08	0,88	0,83	
50	70	70	1,50E-05	1,50E-05	-1,76E-16	1,50E-05	18	2,34E+08	2,83E+08	0,83	0,71	
50	80	70	1,38E-05	1,38E-05	-9,90E-15	1,38E-05	18	2,53E+08	3,23E+08	0,78	0,63	
50	90	70	1,30E-05	1,30E-05	9,10E-14	1,30E-05	17	2,69E+08	3,63E+08	0,74	0,56	
50	100	70	1,23E-05	1,23E-05	-1,55E-13	1,23E-05	16	2,84E+08	4,04E+08	0,70	0,50	
50	110	70	1,18E-05	1,18E-05	-6,80E-14	1,20E-05	16	2,97E+08	4,44E+08	0,67	0,45	
50	120	70	1,13E-05	1,13E-05	-1,36E-13	1,18E-05	16	3,08E+08	4,85E+08	0,64	0,42	
50	130	70	1,10E-05	1,10E-05	-6,31E-14	1,17E-05	16	3,19E+08	5,25E+08	0,61	0,38	
50	140	70	1,07E-05	1,07E-05	-7,33E-14	1,17E-05	16	3,28E+08	5,65E+08	0,58	0,36	
50	150	70	1,04E-05	1,04E-05	-6,56E-15	1,17E-05	16	3,37E+08	6,06E+08	0,56	0,33	
50	160	70	1,01E-05	1,01E-05	-4,88E-14	1,17E-05	16	3,45E+08	6,46E+08	0,53	0,31	
50	170	70	9,93E-06	9,93E-06	7,08E-16	1,18E-05	15	3,53E+08	6,87E+08	0,51	0,29	
50	180	70	9,74E-06	9,74E-06	1,49E-14	1,19E-05	15	3,59E+08	7,27E+08	0,49	0,28	
50	190	70	9,57E-06	9,57E-06	3,34E-14	1,20E-05	14	3,66E+08	7,67E+08	0,48	0,26	
50	200	70	9,43E-06	9,43E-06	1,14E-13	1,22E-05	13	3,71E+08	8,08E+08	0,46	0,25	
60	50	84	2,13E-05	2,13E-05	-5,86E-13	2,13E-05	19	2,36E+08	2,42E+08	0,98	1,20	0,55%
60	60	84	1,86E-05	1,86E-05	-2,27E-13	1,86E-05	19	2,71E+08	2,91E+08	0,93	1,00	1,20%
60	70	84	1,67E-05	1,67E-05	1,79E-13	1,67E-05	18	3,01E+08	3,39E+08	0,89	0,86	
60	80	84	1,53E-05	1,53E-05	-9,03E-14	1,53E-05	17	3,29E+08	3,88E+08	0,85	0,75	
60	90	84	1,43E-05	1,43E-05	-1,37E-13	1,43E-05	17	3,52E+08	4,36E+08	0,81	0,67	
60	100	84	1,35E-05	1,35E-05	-1,93E-14	1,35E-05	16	3,74E+08	4,85E+08	0,77	0,60	
60	110	84	1,28E-05	1,28E-05	-9,68E-14	1,28E-05	15	3,93E+08	5,33E+08	0,74	0,55	
60	120	84	1,23E-05	1,23E-05	-1,20E-13	1,23E-05	15	4,10E+08	5,82E+08	0,71	0,50	
60	130	84	1,18E-05	1,18E-05	-9,66E-14	1,20E-05	15	4,26E+08	6,30E+08	0,68	0,46	
60	140	84	1,15E-05	1,15E-05	-1,46E-13	1,19E-05	15	4,40E+08	6,78E+08	0,65	0,43	
60	150	84	1,11E-05	1,11E-05	-9,79E-14	1,17E-05	15	4,53E+08	7,27E+08	0,62	0,40	
60	160	84	1,08E-05	1,08E-05	-1,18E-13	1,17E-05	15	4,65E+08	7,75E+08	0,60	0,38	

H	B	Fv	uz_b_r	uz_b_l	uz_o_l	uz_max	lod	GAsh	GA	α	H/B	afwijking
60	170	84	1,06E-05	1,06E-05	-3,24E-14	1,16E-05	15	4,76E+08	8,24E+08	0,58	0,35	
60	180	84	1,04E-05	1,04E-05	-7,00E-14	1,17E-05	15	4,87E+08	8,72E+08	0,56	0,33	
60	190	84	1,02E-05	1,02E-05	-4,97E-14	1,17E-05	14	4,96E+08	9,21E+08	0,54	0,32	
60	200	84	9,98E-06	9,98E-06	-3,75E-14	1,18E-05	13	5,05E+08	9,69E+08	0,52	0,30	
70	50	98	2,40E-05	2,40E-05	4,10E-14	2,40E-05	18	2,85E+08	2,83E+08	1,01	1,40	1,58%
70	60	98	2,08E-05	2,08E-05	-1,81E-13	2,08E-05	18	3,30E+08	3,39E+08	0,97	1,17	0,67%
70	70	98	1,85E-05	1,85E-05	-8,65E-14	1,85E-05	18	3,70E+08	3,96E+08	0,93	1,00	0,90%
70	80	98	1,69E-05	1,69E-05	3,77E-14	1,69E-05	17	4,06E+08	4,52E+08	0,90	0,88	
70	90	98	1,57E-05	1,57E-05	-7,76E-14	1,57E-05	16	4,38E+08	5,09E+08	0,86	0,78	
70	100	98	1,47E-05	1,47E-05	-6,92E-14	1,47E-05	16	4,67E+08	5,65E+08	0,83	0,70	
70	110	98	1,39E-05	1,39E-05	-5,49E-14	1,39E-05	15	4,94E+08	6,22E+08	0,79	0,64	
70	120	98	1,33E-05	1,33E-05	-3,65E-14	1,33E-05	15	5,17E+08	6,78E+08	0,76	0,58	
70	130	98	1,27E-05	1,27E-05	-2,41E-14	1,27E-05	14	5,39E+08	7,35E+08	0,73	0,54	
70	140	98	1,23E-05	1,23E-05	-8,70E-14	1,23E-05	13	5,59E+08	7,92E+08	0,71	0,50	
70	150	98	1,19E-05	1,19E-05	-6,32E-14	1,20E-05	13	5,77E+08	8,48E+08	0,68	0,47	
70	160	98	1,15E-05	1,15E-05	-6,89E-14	1,19E-05	13	5,94E+08	9,05E+08	0,66	0,44	
70	170	98	1,12E-05	1,12E-05	-6,44E-14	1,18E-05	13	6,10E+08	9,61E+08	0,63	0,41	
70	180	98	1,10E-05	1,10E-05	-7,95E-14	1,17E-05	13	6,25E+08	1,02E+09	0,61	0,39	
70	190	98	1,07E-05	1,07E-05	-6,16E-14	1,16E-05	13	6,38E+08	1,07E+09	0,59	0,37	
70	200	98	1,05E-05	1,05E-05	-3,21E-14	1,16E-05	13	6,51E+08	1,13E+09	0,58	0,35	
80	50	112	2,68E-05	2,68E-05	-2,22E-13	2,68E-05	18	3,34E+08	3,23E+08	1,03	1,60	1,85%
80	60	112	2,31E-05	2,31E-05	-1,83E-13	2,31E-05	17	3,88E+08	3,88E+08	1,00	1,33	1,63%
80	70	112	2,04E-05	2,04E-05	-5,27E-14	2,04E-05	17	4,38E+08	4,52E+08	0,97	1,14	0,70%
80	80	112	1,85E-05	1,85E-05	-6,59E-14	1,85E-05	17	4,84E+08	5,17E+08	0,94	1,00	0,71%
80	90	112	1,71E-05	1,71E-05	-4,46E-14	1,71E-05	16	5,25E+08	5,82E+08	0,90	0,89	
80	100	112	1,59E-05	1,59E-05	-1,36E-13	1,59E-05	15	5,63E+08	6,46E+08	0,87	0,80	
80	110	112	1,50E-05	1,50E-05	-6,86E-14	1,50E-05	15	5,97E+08	7,11E+08	0,84	0,73	
80	120	112	1,42E-05	1,42E-05	-9,14E-14	1,42E-05	15	6,29E+08	7,75E+08	0,81	0,67	
80	130	112	1,36E-05	1,36E-05	-6,87E-14	1,36E-05	14	6,58E+08	8,40E+08	0,78	0,62	
80	140	112	1,31E-05	1,31E-05	-3,38E-14	1,31E-05	13	6,84E+08	9,05E+08	0,76	0,57	
80	150	112	1,26E-05	1,26E-05	-2,07E-14	1,26E-05	12	7,09E+08	9,69E+08	0,73	0,53	
80	160	112	1,23E-05	1,23E-05	-4,68E-14	1,23E-05	11	7,31E+08	1,03E+09	0,71	0,50	
80	170	112	1,19E-05	1,19E-05	-4,08E-14	1,21E-05	11	7,52E+08	1,10E+09	0,68	0,47	
80	180	112	1,16E-05	1,16E-05	-3,64E-14	1,19E-05	11	7,72E+08	1,16E+09	0,66	0,44	
80	190	112	1,13E-05	1,13E-05	-3,97E-14	1,18E-05	11	7,90E+08	1,23E+09	0,64	0,42	
80	200	112	1,11E-05	1,11E-05	-3,70E-14	1,17E-05	11	8,07E+08	1,29E+09	0,62	0,40	
90	50	126	2,97E-05	2,97E-05	-1,61E-13	2,97E-05	17	3,82E+08	3,63E+08	1,05	1,80	1,75%
90	60	126	2,54E-05	2,54E-05	-1,14E-13	2,54E-05	17	4,47E+08	4,36E+08	1,02	1,50	2,01%
90	70	126	2,24E-05	2,24E-05	-1,09E-13	2,24E-05	16	5,07E+08	5,09E+08	1,00	1,29	1,61%
90	80	126	2,02E-05	2,02E-05	-5,34E-14	2,02E-05	16	5,62E+08	5,82E+08	0,97	1,13	0,70%
90	90	126	1,85E-05	1,85E-05	-8,40E-14	1,85E-05	16	6,13E+08	6,54E+08	0,94	1,00	0,58%
90	100	126	1,72E-05	1,72E-05	-7,25E-14	1,72E-05	15	6,60E+08	7,27E+08	0,91	0,90	
90	110	126	1,61E-05	1,61E-05	-2,88E-14	1,61E-05	14	7,03E+08	8,00E+08	0,88	0,82	
90	120	126	1,53E-05	1,53E-05	-4,17E-14	1,53E-05	13	7,43E+08	8,72E+08	0,85	0,75	
90	130	126	1,45E-05	1,45E-05	-6,32E-14	1,45E-05	13	7,79E+08	9,45E+08	0,82	0,69	
90	140	126	1,39E-05	1,39E-05	-6,28E-14	1,39E-05	13	8,13E+08	1,02E+09	0,80	0,64	
90	150	126	1,34E-05	1,34E-05	-3,76E-14	1,34E-05	12	8,45E+08	1,09E+09	0,77	0,60	
90	160	126	1,30E-05	1,30E-05	-2,61E-14	1,30E-05	11	8,74E+08	1,16E+09	0,75	0,56	

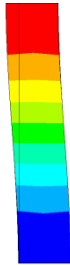
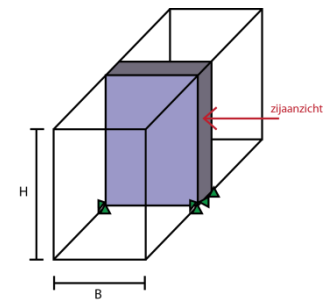
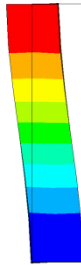
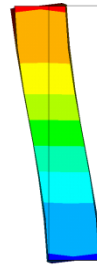
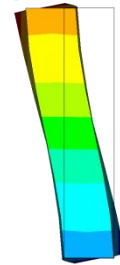
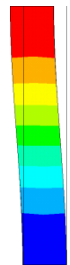
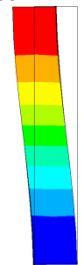
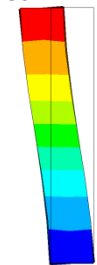
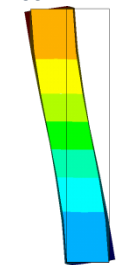
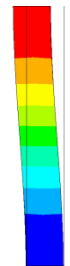
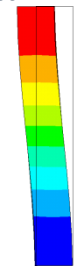
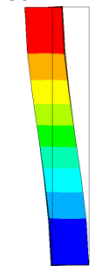
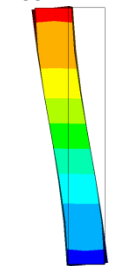
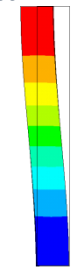
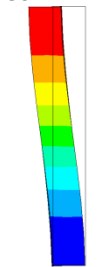
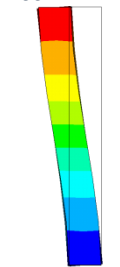
H	B	Fv	uz_b_r	uz_b_l	uz_o_l	uz_max	lod	GAsh	GA	α	H/B	afwijking
90	170	126	1,26E-05	1,26E-05	-2,52E-14	1,26E-05	10	9,01E+08	1,24E+09	0,73	0,53	
90	180	126	1,22E-05	1,22E-05	-1,48E-14	1,22E-05	10	9,26E+08	1,31E+09	0,71	0,50	
90	190	126	1,19E-05	1,19E-05	-1,91E-14	1,21E-05	10	9,50E+08	1,38E+09	0,69	0,47	
90	200	126	1,17E-05	1,17E-05	-2,56E-14	1,19E-05	10	9,72E+08	1,45E+09	0,67	0,45	
100	50	140	3,26E-05	3,26E-05	-3,56E-14	3,26E-05	16	4,30E+08	4,04E+08	1,06	2,00	1,42%
100	60	140	2,77E-05	2,77E-05	-2,74E-14	2,77E-05	16	5,05E+08	4,85E+08	1,04	1,67	2,05%
100	70	140	2,43E-05	2,43E-05	-4,44E-14	2,43E-05	16	5,75E+08	5,65E+08	1,02	1,43	2,05%
100	80	140	2,19E-05	2,19E-05	-1,14E-13	2,19E-05	15	6,41E+08	6,46E+08	0,99	1,25	1,56%
100	90	140	2,00E-05	2,00E-05	-5,85E-14	2,00E-05	15	7,01E+08	7,27E+08	0,96	1,11	0,68%
100	100	140	1,85E-05	1,85E-05	-7,79E-14	1,85E-05	15	7,58E+08	8,08E+08	0,94	1,00	0,49%
100	110	140	1,73E-05	1,73E-05	-6,65E-14	1,73E-05	14	8,10E+08	8,88E+08	0,91	0,91	
100	120	140	1,63E-05	1,63E-05	-3,48E-14	1,63E-05	13	8,59E+08	9,69E+08	0,89	0,83	
100	130	140	1,55E-05	1,55E-05	-4,46E-14	1,55E-05	12	9,04E+08	1,05E+09	0,86	0,77	
100	140	140	1,48E-05	1,48E-05	-3,48E-14	1,48E-05	12	9,45E+08	1,13E+09	0,84	0,71	
100	150	140	1,42E-05	1,42E-05	-2,92E-14	1,42E-05	12	9,84E+08	1,21E+09	0,81	0,67	
100	160	140	1,37E-05	1,37E-05	-3,00E-14	1,37E-05	11	1,02E+09	1,29E+09	0,79	0,63	
100	170	140	1,33E-05	1,33E-05	-2,18E-14	1,33E-05	10	1,05E+09	1,37E+09	0,77	0,59	
100	180	140	1,29E-05	1,29E-05	-8,61E-15	1,29E-05	10	1,09E+09	1,45E+09	0,75	0,56	
100	190	140	1,25E-05	1,25E-05	-3,70E-15	1,25E-05	9	1,12E+09	1,53E+09	0,73	0,53	
100	200	140	1,22E-05	1,22E-05	-3,52E-15	1,22E-05	8	1,14E+09	1,62E+09	0,71	0,50	
110	50	154	3,55E-05	3,55E-05	-6,82E-14	3,55E-05	16	4,77E+08	4,44E+08	1,07	2,20	0,92%
110	60	154	3,01E-05	3,01E-05	-6,99E-14	3,01E-05	15	5,62E+08	5,33E+08	1,06	1,83	1,88%
110	70	154	2,64E-05	2,64E-05	-7,28E-14	2,64E-05	15	6,43E+08	6,22E+08	1,03	1,57	2,19%
110	80	154	2,36E-05	2,36E-05	-5,88E-14	2,36E-05	15	7,19E+08	7,11E+08	1,01	1,38	2,03%
110	90	154	2,15E-05	2,15E-05	-4,41E-14	2,15E-05	14	7,89E+08	8,00E+08	0,99	1,22	1,49%
110	100	154	1,98E-05	1,98E-05	-5,55E-14	1,98E-05	14	8,56E+08	8,88E+08	0,96	1,10	0,65%
110	110	154	1,85E-05	1,85E-05	-5,34E-14	1,85E-05	14	9,18E+08	9,77E+08	0,94	1,00	0,43%
110	120	154	1,74E-05	1,74E-05	-4,45E-14	1,74E-05	13	9,75E+08	1,07E+09	0,91	0,92	
110	130	154	1,65E-05	1,65E-05	-2,27E-14	1,65E-05	12	1,03E+09	1,16E+09	0,89	0,85	
110	140	154	1,57E-05	1,57E-05	-2,70E-14	1,57E-05	11	1,08E+09	1,24E+09	0,87	0,79	
110	150	154	1,50E-05	1,50E-05	-3,01E-14	1,50E-05	11	1,13E+09	1,33E+09	0,85	0,73	
110	160	154	1,45E-05	1,45E-05	-2,72E-14	1,45E-05	11	1,17E+09	1,42E+09	0,82	0,69	
110	170	154	1,40E-05	1,40E-05	-1,83E-14	1,40E-05	10	1,21E+09	1,51E+09	0,80	0,65	
110	180	154	1,35E-05	1,35E-05	-1,13E-14	1,35E-05	10	1,25E+09	1,60E+09	0,78	0,61	
110	190	154	1,32E-05	1,32E-05	-3,46E-15	1,32E-05	9	1,29E+09	1,69E+09	0,76	0,58	
110	200	154	1,28E-05	1,28E-05	-7,01E-15	1,28E-05	8	1,32E+09	1,78E+09	0,74	0,55	
120	50	168	3,84E-05	3,84E-05	-1,58E-14	3,84E-05	16	5,25E+08	4,85E+08	1,08	2,40	0,34%
120	60	168	3,25E-05	3,25E-05	-1,03E-13	3,25E-05	15	6,20E+08	5,82E+08	1,07	2,00	1,55%
120	70	168	2,84E-05	2,84E-05	-6,79E-14	2,84E-05	15	7,10E+08	6,78E+08	1,05	1,71	2,13%
120	80	168	2,53E-05	2,53E-05	-9,73E-14	2,53E-05	15	7,96E+08	7,75E+08	1,03	1,50	2,24%
120	90	168	2,30E-05	2,30E-05	-5,34E-14	2,30E-05	13	8,77E+08	8,72E+08	1,01	1,33	1,98%
120	100	168	2,11E-05	2,11E-05	-4,75E-14	2,11E-05	13	9,54E+08	9,69E+08	0,98	1,20	1,42%
120	110	168	1,97E-05	1,97E-05	-3,90E-14	1,97E-05	13	1,03E+09	1,07E+09	0,96	1,09	0,62%
120	120	168	1,85E-05	1,85E-05	-4,17E-14	1,85E-05	13	1,09E+09	1,16E+09	0,94	1,00	0,38%
120	130	168	1,74E-05	1,74E-05	-3,60E-14	1,74E-05	12	1,16E+09	1,26E+09	0,92	0,92	
120	140	168	1,66E-05	1,66E-05	-2,45E-14	1,66E-05	11	1,22E+09	1,36E+09	0,90	0,86	
120	150	168	1,59E-05	1,59E-05	-1,98E-14	1,59E-05	10	1,27E+09	1,45E+09	0,87	0,80	
120	160	168	1,52E-05	1,52E-05	-1,41E-14	1,52E-05	10	1,32E+09	1,55E+09	0,85	0,75	

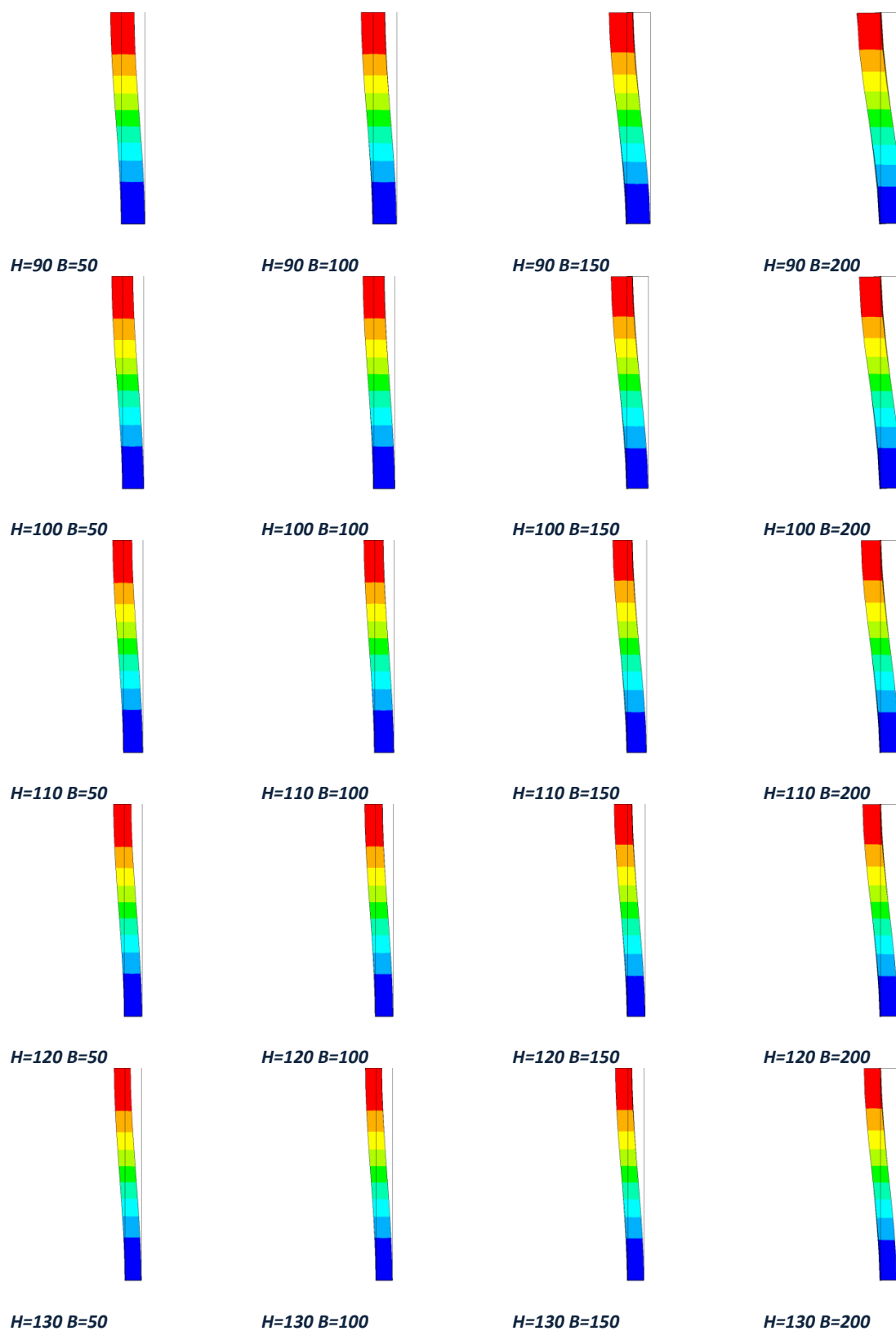
H	B	Fv	uz_b_r	uz_b_l	uz_o_l	uz_max	lod	GAsh	GA	α	H/B	afwijking
120	170	168	1,47E-05	1,47E-05	-1,64E-14	1,47E-05	10	1,37E+09	1,65E+09	0,83	0,71	
120	180	168	1,42E-05	1,42E-05	-1,37E-14	1,42E-05	10	1,42E+09	1,74E+09	0,81	0,67	
120	190	168	1,38E-05	1,38E-05	-9,93E-15	1,38E-05	9	1,46E+09	1,84E+09	0,79	0,63	
120	200	168	1,34E-05	1,34E-05	-5,55E-15	1,34E-05	8	1,50E+09	1,94E+09	0,78	0,60	
130	50	182	4,14E-05	4,14E-05	-6,87E-14	4,14E-05	16	5,72E+08	5,25E+08	1,09	2,60	0,30%
130	60	182	3,50E-05	3,50E-05	-4,92E-14	3,50E-05	15	6,77E+08	6,30E+08	1,07	2,17	1,13%
130	70	182	3,04E-05	3,04E-05	-4,21E-14	3,04E-05	14	7,77E+08	7,35E+08	1,06	1,86	1,93%
130	80	182	2,71E-05	2,71E-05	-4,65E-14	2,71E-05	14	8,73E+08	8,40E+08	1,04	1,63	2,26%
130	90	182	2,45E-05	2,45E-05	-7,00E-14	2,45E-05	13	9,65E+08	9,45E+08	1,02	1,44	2,24%
130	100	182	2,25E-05	2,25E-05	-3,61E-14	2,25E-05	12	1,05E+09	1,05E+09	1,00	1,30	1,91%
130	110	182	2,09E-05	2,09E-05	-2,81E-14	2,09E-05	12	1,13E+09	1,16E+09	0,98	1,18	1,35%
130	120	182	1,96E-05	1,96E-05	-2,41E-14	1,96E-05	12	1,21E+09	1,26E+09	0,96	1,08	0,58%
130	130	182	1,84E-05	1,84E-05	-2,94E-14	1,84E-05	12	1,28E+09	1,37E+09	0,94	1,00	0,34%
130	140	182	1,75E-05	1,75E-05	-1,81E-14	1,75E-05	11	1,35E+09	1,47E+09	0,92	0,93	
130	150	182	1,67E-05	1,67E-05	-8,57E-15	1,67E-05	10	1,42E+09	1,58E+09	0,90	0,87	
130	160	182	1,60E-05	1,60E-05	-8,17E-15	1,60E-05	9	1,48E+09	1,68E+09	0,88	0,81	
130	170	182	1,54E-05	1,54E-05	-8,89E-15	1,54E-05	8	1,53E+09	1,79E+09	0,86	0,76	
130	180	182	1,49E-05	1,49E-05	-4,53E-15	1,49E-05	8	1,59E+09	1,89E+09	0,84	0,72	
130	190	182	1,44E-05	1,44E-05	-3,70E-15	1,44E-05	8	1,64E+09	2,00E+09	0,82	0,68	
130	200	182	1,40E-05	1,40E-05	-1,84E-15	1,40E-05	8	1,69E+09	2,10E+09	0,80	0,65	
140	50	196	4,43E-05	4,43E-05	-6,93E-14	4,43E-05	16	6,19E+08	5,65E+08	1,09	2,80	0,96%
140	60	196	3,74E-05	3,74E-05	-8,17E-14	3,74E-05	15	7,34E+08	6,78E+08	1,08	2,33	0,64%
140	70	196	3,25E-05	3,25E-05	-3,93E-14	3,25E-05	13	8,44E+08	7,92E+08	1,07	2,00	1,63%
140	80	196	2,89E-05	2,89E-05	-3,95E-14	2,89E-05	13	9,50E+08	9,05E+08	1,05	1,75	2,16%
140	90	196	2,61E-05	2,61E-05	-4,71E-14	2,61E-05	13	1,05E+09	1,02E+09	1,03	1,56	2,33%
140	100	196	2,39E-05	2,39E-05	-2,65E-14	2,39E-05	12	1,15E+09	1,13E+09	1,02	1,40	2,20%
140	110	196	2,21E-05	2,21E-05	-2,30E-14	2,21E-05	11	1,24E+09	1,24E+09	1,00	1,27	1,84%
140	120	196	2,07E-05	2,07E-05	-1,41E-14	2,07E-05	11	1,33E+09	1,36E+09	0,98	1,17	1,28%
140	130	196	1,95E-05	1,95E-05	-1,97E-14	1,95E-05	11	1,41E+09	1,47E+09	0,96	1,08	0,55%
140	140	196	1,84E-05	1,84E-05	-1,69E-14	1,84E-05	11	1,49E+09	1,58E+09	0,94	1,00	0,31%
140	150	196	1,76E-05	1,76E-05	-1,51E-14	1,76E-05	10	1,56E+09	1,70E+09	0,92	0,93	
140	160	196	1,68E-05	1,68E-05	-4,24E-15	1,68E-05	9	1,63E+09	1,81E+09	0,90	0,88	
140	170	196	1,61E-05	1,61E-05	-4,05E-15	1,61E-05	8	1,70E+09	1,92E+09	0,88	0,82	
140	180	196	1,56E-05	1,56E-05	1,68E-16	1,56E-05	7	1,76E+09	2,04E+09	0,87	0,78	
140	190	196	1,51E-05	1,51E-05	-3,96E-15	1,51E-05	7	1,82E+09	2,15E+09	0,85	0,74	
140	200	196	1,46E-05	1,46E-05	-1,21E-15	1,46E-05	7	1,88E+09	2,26E+09	0,83	0,70	
150	50	210	4,73E-05	4,73E-05	-7,49E-14	4,73E-05	16	6,66E+08	6,06E+08	1,10	3,00	1,64%
150	60	210	3,99E-05	3,99E-05	-9,00E-14	3,99E-05	15	7,90E+08	7,27E+08	1,09	2,50	0,11%
150	70	210	3,46E-05	3,46E-05	-4,92E-14	3,46E-05	13	9,11E+08	8,48E+08	1,07	2,14	1,26%
150	80	210	3,07E-05	3,07E-05	-1,85E-14	3,07E-05	12	1,03E+09	9,69E+08	1,06	1,88	1,95%
150	90	210	2,77E-05	2,77E-05	-1,96E-14	2,77E-05	12	1,14E+09	1,09E+09	1,04	1,67	2,29%
150	100	210	2,53E-05	2,53E-05	-2,37E-14	2,53E-05	12	1,25E+09	1,21E+09	1,03	1,50	2,34%
150	110	210	2,34E-05	2,34E-05	-1,74E-14	2,34E-05	11	1,35E+09	1,33E+09	1,01	1,36	2,16%
150	120	210	2,18E-05	2,18E-05	-9,03E-15	2,18E-05	10	1,44E+09	1,45E+09	0,99	1,25	1,77%
150	130	210	2,05E-05	2,05E-05	-1,37E-14	2,05E-05	10	1,54E+09	1,58E+09	0,98	1,15	1,21%
150	140	210	1,94E-05	1,94E-05	-1,08E-14	1,94E-05	10	1,63E+09	1,70E+09	0,96	1,07	0,52%
150	150	210	1,84E-05	1,84E-05	-1,11E-14	1,84E-05	10	1,71E+09	1,82E+09	0,94	1,00	0,29%
150	160	210	1,76E-05	1,76E-05	-6,55E-15	1,76E-05	9	1,79E+09	1,94E+09	0,92	0,94	

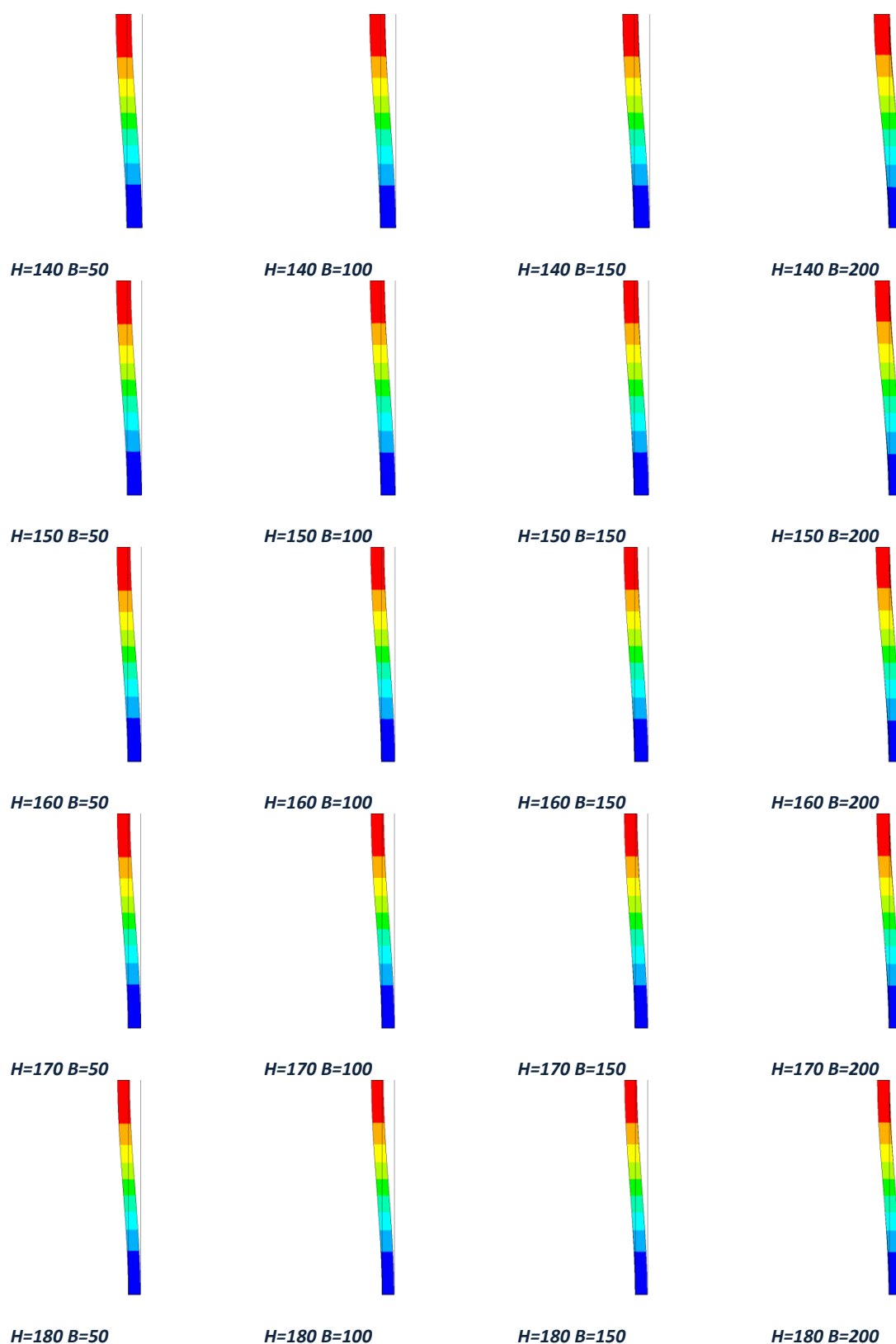
H	B	Fv	uz_b_r	uz_b_l	uz_o_l	uz_max	lod	GAsh	GA	α	H/B	afwijking
150	170	210	1,69E-05	1,69E-05	-3,09E-15	1,69E-05	8	1,86E+09	2,06E+09	0,91	0,88	
150	180	210	1,63E-05	1,63E-05	-5,26E-15	1,63E-05	7	1,94E+09	2,18E+09	0,89	0,83	
150	190	210	1,57E-05	1,57E-05	-1,19E-15	1,57E-05	6	2,00E+09	2,30E+09	0,87	0,79	
150	200	210	1,52E-05	1,52E-05	-1,54E-15	1,52E-05	6	2,07E+09	2,42E+09	0,85	0,75	
160	50	224	5,03E-05	5,03E-05	-5,42E-14	5,03E-05	16	7,12E+08	6,46E+08	1,10	3,20	2,32%
160	60	224	4,23E-05	4,23E-05	-1,28E-13	4,23E-05	15	8,47E+08	7,75E+08	1,09	2,67	0,44%
160	70	224	3,67E-05	3,67E-05	-3,05E-14	3,67E-05	13	9,77E+08	9,05E+08	1,08	2,29	0,85%
160	80	224	3,25E-05	3,25E-05	-1,83E-14	3,25E-05	11	1,10E+09	1,03E+09	1,07	2,00	1,68%
160	90	224	2,93E-05	2,93E-05	-2,23E-14	2,93E-05	11	1,22E+09	1,16E+09	1,05	1,78	2,16%
160	100	224	2,67E-05	2,67E-05	-2,23E-14	2,67E-05	11	1,34E+09	1,29E+09	1,04	1,60	2,36%
160	110	224	2,46E-05	2,46E-05	-1,09E-14	2,46E-05	11	1,45E+09	1,42E+09	1,02	1,45	2,33%
160	120	224	2,30E-05	2,30E-05	1,70E-16	2,30E-05	10	1,56E+09	1,55E+09	1,01	1,33	2,10%
160	130	224	2,15E-05	2,15E-05	-5,23E-15	2,15E-05	9	1,66E+09	1,68E+09	0,99	1,23	1,69%
160	140	224	2,03E-05	2,03E-05	-5,49E-15	2,03E-05	9	1,76E+09	1,81E+09	0,97	1,14	1,15%
160	150	224	1,93E-05	1,93E-05	-5,74E-15	1,93E-05	9	1,86E+09	1,94E+09	0,96	1,07	0,49%
160	160	224	1,84E-05	1,84E-05	-5,08E-15	1,84E-05	9	1,94E+09	2,07E+09	0,94	1,00	0,27%
160	170	224	1,77E-05	1,77E-05	-4,76E-15	1,77E-05	8	2,03E+09	2,20E+09	0,92	0,94	
160	180	224	1,70E-05	1,70E-05	-3,19E-15	1,70E-05	7	2,11E+09	2,33E+09	0,91	0,89	
160	190	224	1,64E-05	1,64E-05	-2,81E-15	1,64E-05	6	2,19E+09	2,46E+09	0,89	0,84	
160	200	224	1,58E-05	1,58E-05	-1,06E-15	1,58E-05	5	2,26E+09	2,58E+09	0,88	0,80	
170	50	238	5,33E-05	5,33E-05	-1,76E-14	5,33E-05	15	7,59E+08	6,87E+08	1,11	3,40	2,99%
170	60	238	4,48E-05	4,48E-05	-6,02E-14	4,48E-05	15	9,03E+08	8,24E+08	1,10	2,83	1,00%
170	70	238	3,88E-05	3,88E-05	-4,24E-14	3,88E-05	13	1,04E+09	9,61E+08	1,09	2,43	0,40%
170	80	238	3,43E-05	3,43E-05	-1,98E-14	3,43E-05	11	1,18E+09	1,10E+09	1,07	2,13	1,36%
170	90	238	3,09E-05	3,09E-05	-2,01E-14	3,09E-05	10	1,31E+09	1,24E+09	1,06	1,89	1,96%
170	100	238	2,81E-05	2,81E-05	-1,63E-14	2,81E-05	10	1,44E+09	1,37E+09	1,05	1,70	2,29%
170	110	238	2,59E-05	2,59E-05	-1,30E-14	2,59E-05	10	1,56E+09	1,51E+09	1,03	1,55	2,39%
170	120	238	2,41E-05	2,41E-05	-9,90E-15	2,41E-05	10	1,68E+09	1,65E+09	1,02	1,42	2,29%
170	130	238	2,26E-05	2,26E-05	-7,08E-15	2,26E-05	8	1,79E+09	1,79E+09	1,00	1,31	2,03%
170	140	238	2,13E-05	2,13E-05	-2,78E-15	2,13E-05	8	1,90E+09	1,92E+09	0,99	1,21	1,62%
170	150	238	2,02E-05	2,02E-05	-5,00E-15	2,02E-05	8	2,00E+09	2,06E+09	0,97	1,13	1,10%
170	160	238	1,93E-05	1,93E-05	-5,51E-15	1,93E-05	8	2,10E+09	2,20E+09	0,96	1,06	0,47%
170	170	238	1,84E-05	1,84E-05	-5,10E-15	1,84E-05	8	2,20E+09	2,33E+09	0,94	1,00	0,26%
170	180	238	1,77E-05	1,77E-05	-2,57E-15	1,77E-05	7	2,29E+09	2,47E+09	0,92	0,94	
170	190	238	1,71E-05	1,71E-05	-1,03E-15	1,71E-05	6	2,37E+09	2,61E+09	0,91	0,89	
170	200	238	1,65E-05	1,65E-05	-1,30E-15	1,65E-05	5	2,46E+09	2,75E+09	0,89	0,85	
180	50	252	5,63E-05	5,63E-05	-5,26E-14	5,63E-05	15	8,05E+08	7,27E+08	1,11	3,60	3,66%
180	60	252	4,73E-05	4,73E-05	-5,24E-14	4,73E-05	15	9,59E+08	8,72E+08	1,10	3,00	1,57%
180	70	252	4,09E-05	4,09E-05	-2,84E-14	4,09E-05	13	1,11E+09	1,02E+09	1,09	2,57	0,07%
180	80	252	3,61E-05	3,61E-05	-1,88E-14	3,61E-05	11	1,26E+09	1,16E+09	1,08	2,25	0,99%
180	90	252	3,25E-05	3,25E-05	-1,26E-14	3,25E-05	10	1,40E+09	1,31E+09	1,07	2,00	1,71%
180	100	252	2,96E-05	2,96E-05	-1,04E-14	2,96E-05	10	1,53E+09	1,45E+09	1,06	1,80	2,15%
180	110	252	2,72E-05	2,72E-05	-1,24E-14	2,72E-05	10	1,67E+09	1,60E+09	1,04	1,64	2,37%
180	120	252	2,53E-05	2,53E-05	-7,80E-15	2,53E-05	10	1,79E+09	1,74E+09	1,03	1,50	2,39%
180	130	252	2,37E-05	2,37E-05	-6,04E-15	2,37E-05	8	1,92E+09	1,89E+09	1,01	1,38	2,25%
180	140	252	2,23E-05	2,23E-05	-2,82E-15	2,23E-05	7	2,04E+09	2,04E+09	1,00	1,29	1,96%
180	150	252	2,11E-05	2,11E-05	-3,66E-15	2,11E-05	7	2,15E+09	2,18E+09	0,99	1,20	1,55%
180	160	252	2,01E-05	2,01E-05	-3,85E-15	2,01E-05	7	2,26E+09	2,33E+09	0,97	1,13	1,04%

H	B	Fv	uz_b_r	uz_b_l	uz_o_l	uz_max	lod	GAsh	GA	α	H/B	afwijking
180	170	252	1,92E-05	1,92E-05	-4,32E-16	1,92E-05	7	2,36E+09	2,47E+09	0,96	1,06	0,44%
180	180	252	1,84E-05	1,84E-05	-3,07E-15	1,84E-05	7	2,46E+09	2,62E+09	0,94	1,00	0,24%
180	190	252	1,77E-05	1,77E-05	-4,68E-16	1,77E-05	6	2,56E+09	2,76E+09	0,93	0,95	
180	200	252	1,71E-05	1,71E-05	-3,36E-16	1,71E-05	5	2,65E+09	2,91E+09	0,91	0,90	
190	50	266	5,93E-05	5,93E-05	-4,44E-14	5,93E-05	14	8,52E+08	7,67E+08	1,11	3,80	4,32%
190	60	266	4,98E-05	4,98E-05	-3,36E-14	4,98E-05	14	1,02E+09	9,21E+08	1,10	3,17	2,15%
190	70	266	4,30E-05	4,30E-05	-3,95E-14	4,30E-05	13	1,17E+09	1,07E+09	1,09	2,71	0,55%
190	80	266	3,80E-05	3,80E-05	-1,05E-14	3,80E-05	11	1,33E+09	1,23E+09	1,08	2,38	0,61%
190	90	266	3,41E-05	3,41E-05	-1,25E-14	3,41E-05	10	1,48E+09	1,38E+09	1,07	2,11	1,42%
190	100	266	3,10E-05	3,10E-05	-2,35E-15	3,10E-05	9	1,63E+09	1,53E+09	1,06	1,90	1,96%
190	110	266	2,85E-05	2,85E-05	1,22E-16	2,85E-05	9	1,77E+09	1,69E+09	1,05	1,73	2,28%
190	120	266	2,65E-05	2,65E-05	-4,82E-15	2,65E-05	9	1,91E+09	1,84E+09	1,04	1,58	2,41%
190	130	266	2,47E-05	2,47E-05	-5,13E-15	2,47E-05	8	2,04E+09	2,00E+09	1,02	1,46	2,38%
190	140	266	2,33E-05	2,33E-05	-2,65E-15	2,33E-05	7	2,17E+09	2,15E+09	1,01	1,36	2,20%
190	150	266	2,20E-05	2,20E-05	1,87E-16	2,20E-05	6	2,29E+09	2,30E+09	1,00	1,27	1,90%
190	160	266	2,09E-05	2,09E-05	-2,50E-15	2,09E-05	6	2,41E+09	2,46E+09	0,98	1,19	1,49%
190	170	266	2,00E-05	2,00E-05	-2,94E-15	2,00E-05	6	2,53E+09	2,61E+09	0,97	1,12	0,99%
190	180	266	1,92E-05	1,92E-05	-1,19E-15	1,92E-05	6	2,64E+09	2,76E+09	0,95	1,06	0,42%
190	190	266	1,84E-05	1,84E-05	-1,48E-16	1,84E-05	6	2,74E+09	2,92E+09	0,94	1,00	0,23%
190	200	266	1,78E-05	1,78E-05	-1,38E-16	1,78E-05	5	2,84E+09	3,07E+09	0,93	0,95	
200	50	280	6,23E-05	6,23E-05	-2,45E-14	6,23E-05	13	8,98E+08	8,08E+08	1,11	4,00	4,97%
200	60	280	5,23E-05	5,23E-05	-3,31E-14	5,23E-05	13	1,07E+09	9,69E+08	1,11	3,33	2,72%
200	70	280	4,51E-05	4,51E-05	-2,76E-14	4,51E-05	13	1,24E+09	1,13E+09	1,10	2,86	1,04%
200	80	280	3,98E-05	3,98E-05	-2,08E-14	3,98E-05	11	1,41E+09	1,29E+09	1,09	2,50	0,20%
200	90	280	3,57E-05	3,57E-05	-7,57E-15	3,57E-05	10	1,57E+09	1,45E+09	1,08	2,22	1,10%
200	100	280	3,25E-05	3,25E-05	-1,67E-15	3,25E-05	8	1,72E+09	1,62E+09	1,07	2,00	1,74%
200	110	280	2,98E-05	2,98E-05	-1,04E-15	2,98E-05	8	1,88E+09	1,78E+09	1,06	1,82	2,14%
200	120	280	2,76E-05	2,76E-05	-4,40E-15	2,76E-05	8	2,03E+09	1,94E+09	1,04	1,67	2,36%
200	130	280	2,58E-05	2,58E-05	-9,78E-16	2,58E-05	8	2,17E+09	2,10E+09	1,03	1,54	2,42%
200	140	280	2,43E-05	2,43E-05	9,24E-16	2,43E-05	7	2,31E+09	2,26E+09	1,02	1,43	2,35%
200	150	280	2,29E-05	2,29E-05	-1,33E-15	2,29E-05	6	2,44E+09	2,42E+09	1,01	1,33	2,15%
200	160	280	2,18E-05	2,18E-05	4,07E-16	2,18E-05	5	2,57E+09	2,58E+09	0,99	1,25	1,84%
200	170	280	2,08E-05	2,08E-05	-1,37E-15	2,08E-05	5	2,69E+09	2,75E+09	0,98	1,18	1,43%
200	180	280	1,99E-05	1,99E-05	-4,45E-16	1,99E-05	5	2,81E+09	2,91E+09	0,97	1,11	0,95%
200	190	280	1,91E-05	1,91E-05	-3,97E-16	1,91E-05	5	2,93E+09	3,07E+09	0,95	1,05	0,40%
200	200	280	1,84E-05	1,84E-05	-5,62E-16	1,84E-05	5	3,04E+09	3,23E+09	0,94	1,00	0,22%

Bijlage H: Afschuiving middenplak tweede modellering

 $H=50$ $B=50$  $H=50$ $B=100$  $H=50$ $B=150$  $H=50$ $B=200$  $H=60$ $B=50$  $H=60$ $B=100$  $H=60$ $B=150$  $H=60$ $B=200$  $H=70$ $B=50$  $H=70$ $B=100$  $H=70$ $B=150$  $H=70$ $B=200$  $H=80$ $B=50$  $H=80$ $B=100$  $H=80$ $B=150$  $H=80$ $B=200$





Bijlage I: Matlab-bestanden van nieuwe formule

$$\beta = \log \frac{H}{B}$$

$$\alpha = 0,933 + 0,266\beta - 0,114\beta^2 - 0,017\beta^3 + 0,019\beta^4$$

$$formule_{model2} = GA_{sh} = \alpha GA$$

model2.m

```
function afschuifstijfheid = model2(H,B)
G=2.1e5/2.6;
A=H.*B;
x1=log(H./B);
alpha=0.933+0.266.*x1-0.114.*x1.^2-0.017.*x1.^3+0.019.*x1.^4;
afschuifstijfheid=alpha.*G.*A;
end
```

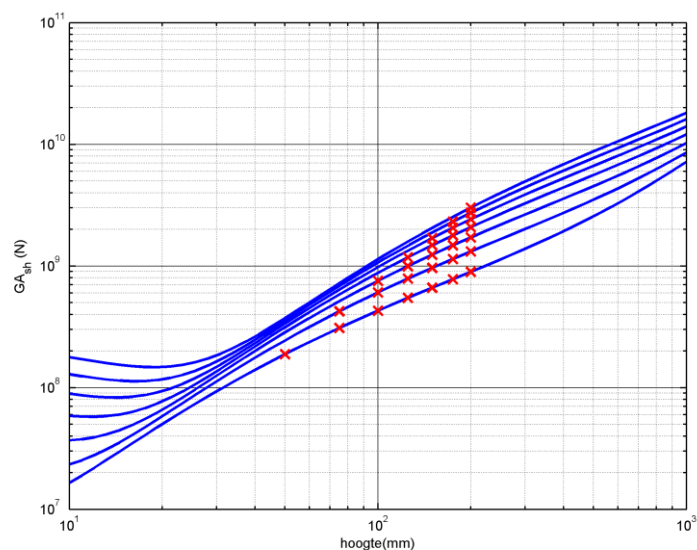
plotformulemodel2.m

```
clear all; close all; clc;

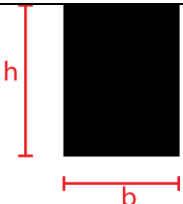
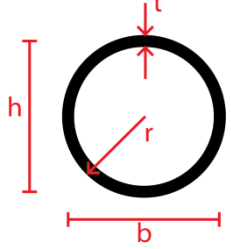
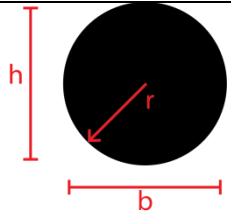
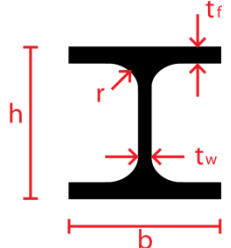
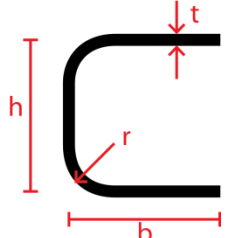
x=logspace(1,3);
for B=50:25:200
loglog(x,model2(x,B),'b-','LineWidth',2);
hold on
end

for H=50:25:200
    for B=50:25:H
        loglog(H,model2(H,B),'rx-','MarkerSize',10,'LineWidth',2);
        hold on
    end
end
grid on
set(gca,'LineWidth',1);
set(gca,'GridLineStyle','-');
xlabel('hoogte(mm)');
ylabel('GAsh (N)');
print('-dpng','-r300','plotformulemodel2');
```

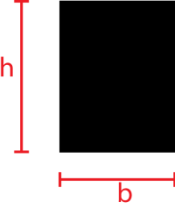
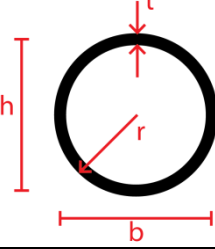
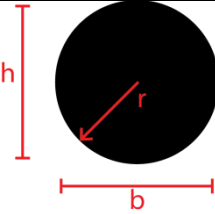
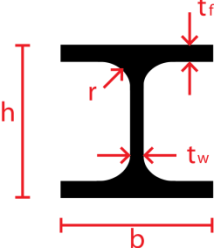
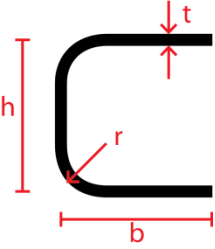
In de grafiek rechts zijn met kruisjes de waarden uit bijlage G voor $\frac{h}{b} \geq 1$ weergegeven. De blauwe lijnen staan elk voor een andere breedte, namelijk van 50mm tot en met 200mm (zie ook bijlage G) en volgen uit bovenstaande Matlab-files.



Bijlage J: Overzicht oude formules

	Afschuifstijfheid	Maximale schuifspanning
	$\frac{5}{6} GA$ 30%	$\frac{3 V}{2 A}$ 12%
	$\frac{1}{2} GA$ 75%	$2 \frac{V}{A}$ 10%
	$\frac{32}{37} GA$ 50%	$\frac{4 V}{3 A}$ voor $\frac{t}{r} = 1$ 6%
	$G t_w (h - 2 t_f)$ 45%	$\frac{V}{t_w (h - 2 t_f)}$ 25%
	$G t (h - 2 t)$ 53%	$\frac{V}{t (h - 2 t)}$ 13%

Bijlage K: Overzicht nieuwe formules

	Afschuifstijfheid	Maximale schuifspanning
	$0.943GA\left(\frac{h}{b}\right)^{0.154}$ voor $4 > \frac{h}{b} \geq 1$ 5.0%	$\frac{3V}{2A} \text{ voor } \frac{h}{b} \geq 1$ $\left(0.2\frac{b}{h} + 1.5\right)\frac{V}{A} \text{ voor } \frac{h}{b} < 1$ <u>12%</u>
	$\left(\frac{1}{2} + \frac{3t}{4r}\right)GA$ <u>onbekend</u>	$\left(2 + \frac{t}{r}\right)\frac{V}{A}$ <u>onbekend</u>
	$\frac{5}{4}GA$ 4,2%	$\frac{3V}{2A}$ 5,7%
	$Gt_w(h + t_f) * \left(\frac{23}{25} + \frac{1}{5}\frac{b}{h} + \frac{1}{18}\frac{r}{t_w}\right)$ <u>8%</u>	$\frac{V}{t_w(h - 2t_f)} *$ $\left(\frac{25}{26} + \frac{1}{35}\frac{h}{b} + \frac{1}{10}\frac{t_w}{t_f}\right)$ 3%
	$Gt(h - 2t) * \left(\frac{157}{200} - \frac{77}{11}\frac{h}{b} - \frac{689}{100}\frac{b}{h} + \frac{7}{20}\frac{b}{t} + \frac{1099}{50}\frac{t}{b} - \frac{683}{5000}\frac{r}{t}\right)$ 5%	$\frac{V}{\sqrt{3} * t \left(h - \frac{723}{250}t\right)} *$ $\left(\frac{1141}{1000} - \frac{179}{5000}\frac{h}{b} + \frac{39}{2500}\frac{r}{t}\right)$ 0,8%